

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta Strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Testování nástrojů technologie zpětného soustružení

Tools Testing for Turning technology with Reverse
Feed

Student: Martin Kocián

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Kocián**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Testování nástrojů technologie zpětného soustružení**
Tools Testing for Turning Technology with Reverse Feed
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše technologie soustružení zpětným posuvem.
2. Návrh a příprava experimentu.
3. Provedení experimentální části.
4. Kontrola a měření parametrů VBD.
5. Vyhodnocení zkoušek a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

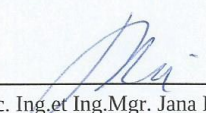
BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.
STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. *Metal cutting theory and practice*. New York : Marcel Dekker, Inc., 1997. ISBN 0-8247-9579-2.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jen uvedené prameny a literaturu.

Datum:

18.05.2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Kocián', is written above a horizontal line.

Podpis

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20.2.2020



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Martin Kocián

Adresa trvalého pobytu autora práce: Olomouc, Voskovcova 4

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Kocián, M. Technologie soustružení se zpětným posuvem. Ostrava, 2020: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 71 s. Vedoucí práce: doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá průběhem výsledné síly, jejích složek, tvaru třísky při technologii zpětného soustružení a drsnosti obrobeného povrchu. První část bakalářské práce obsahuje seznámení s technologií a jejími výhodami či nevýhodami. Druhá část je zaměřena na přípravu experimentu, použití nástroje a CNC obráběcího centra. Následuje třetí část, kde probíhá vyhodnocení opotřebení VBD na čele, špičce nebo hřbetu nástroje. Poslední část se vyhodnocuje silová analýza a drsnost povrchu destiček s označením CP – B1108 – M5 4325, CP – B1108 M5 1115 a CP – B1108 – H3W H13A. Veškeré zaznamenané výsledky byly uvedeny přehledně do tabulek a následně doporučena vhodná VBD.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Kocián, M. Reverse feed turning technology. Ostrava, 2020: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 71 pp. Thesis supervisor: doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.

The bachelor thesis deals with the course of the resulting force, its components, the shape of the chip in the technology of reverse turning and the roughness of the machined surface. The first part of the thesis contains an introduction to technology and its advantages or disadvantages. The second part is focused on experiment preparation, tool usage and CNC machining center. This is followed by the third part, where the insert wear evaluation is performed on the face, tip or back of the tool. The last part evaluates the strength analysis and surface roughness of plates marked CP - B1108 - M5 4325, CP - B1108 M5 1115 and CP - B1108 - H3W H13A. All recorded results were presented in tables and recommended appropriate insert.

Poděkování

Děkuji tímto své vedoucí bakalářské práce doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petru, Ph.D. za čas, pozornost a odborné rady při řešení této práce.

Obsah

Úvod	11
1 Soustružení se zpětným posuvem	12
1.1 Historie firmy Sandvik Coromant CZ s.r.o.	12
1.2 Problematika zpětného soustružení.....	12
1.3 Popis technologie zpětného soustružení.....	13
1.4 Nástroje pro zpětné soustružení	15
1.4.1 VBD typu A	15
1.4.2 VBD typu B.....	16
1.4.3 Srovnání řezných podmínek.....	18
1.5 Geometrie břitu VBD	20
1.6 Použití zpětného soustružení	21
1.6.1 Soustružení podélné plochy	21
1.6.2 Soustružení vnitřních ploch	22
1.7 Odvod třísky z místa řezu.....	22
1.8 Software.....	23
2 Návrh a příprava experimentu	24
2.1 Obráběné materiály	26
2.1.1 Uhlíková ocel C45 (ČSN 12 050.1).....	26
2.1.2 Korozi vzdorná ocel 1.4404 (ČSN 17. 349).....	27
2.2 Obráběcí stroj.....	27
2.2.1 Procesní médium	28
2.2.2 Nástrojový držák pro vyměnitelné břitové destičky.....	29
2.2.3 Použité vyměnitelné břitové destičky.....	30

2.3	Dynamometr	31
2.4	Mikroskop pro měření VBD	33
2.5	Přístroj sloužící k měření drsnosti povrchu	34
3	Provedení experimentální části	36
4	Měření opotřebení řezného nástroje po aplikaci zpětného soustružení.....	40
4.1	Měření opotřebení VBD CP – B1108 – M5 4325	40
4.2	Měření opotřebení VBD CP – B1108 – M5 1115	44
4.3	Měření opotřebení VBD CP – B1108 – H3W H13A.....	48
5	Vyhodnocení, porovnání řezných sil a drsnosti povrchu	51
5.1	Vzorce pro vyhodnocení dat.....	51
5.2	Vyhodnocení řezných sil a parametrů drsnosti povrchu Ra VBD CP-B1108-M5 4325 pro ocel C45	53
5.3	Vyhodnocení řezných sil a parametrů drsnosti povrchu Ra VBD CP-B1108-M5 1115 pro ocel C45	56
5.4	Vyhodnocení řezných sil a parametrů drsnosti povrchu Ra VBD CP-B1108-H3W H13A pro ocel C45	59
5.5	Vyhodnocení řezných sil a parametrů drsnosti povrchu Ra VBD CP – B1108 – M5 4325, CP B1108 – M5 1115 a CP-B1108-H3W H13A pro korozivzdornou ocel 1.4404	62
5.6	Charakteristika třísek.....	67
6	Závěr.....	69
	Seznam použitých zdrojů.....	70

Seznam použitých značek, zkratek a symbolů

A	- tažnost	[%]
CVD	- Chemical Vapor Deposition (chemické napařování z plynné fáze)	[-]
EBW	- čelní zpětné soustružení	[-]
EFW	- čelní dopředné soustružení	[-]
F_c	- řezná složka síly obrábění	[N]
F_f	- posuvová složka síly obrábění	[N]
F_p	- pasivní složka síly obrábění	[N]
F_v	- výsledná řezná síla	[N]
K	- skupina obráběných materiálů – litina	[-]
KB	- šířka žlábků na čele	[-]
M	- skupina obráběných materiálů – korozivzdorná ocel	[-]
P	- skupina obráběných materiálů - ocel	[-]
PVD	- Physical Vapor Deposition (fyzikální napařování z plynné fáze)	[-]
Ra	- průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	[μ m]
RE	- poloměr špičky VBD	[mm]
Rm	- mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	- mez kluzu	[MPa]
Rz	- maximální výška profilu	[μ m]
S_o	- skupina obráběných materiálů – žáruvzdorné slitiny	[-]
S	- šířka VBD	[mm]
SBW	- stranové zpětné soustružení	[-]
SFW	- stranové dopředné soustružení	[-]
VB_{max}	- maximální opotřebení na hřbetu	[-]
VBD	- vyměnitelná břitová destička	[-]
a_p	- hloubka řezu	[mm]
a_p dop.	- hloubka řezu doporučená	[mm]
a_p max.	- hloubka řezu maximální	[mm]
a_p min.	- hloubka řezu minimální	[mm]
f	- posuv	[mm]
f_n	- posuv na otáčku	[mm]
f_n dop.	- posuv doporučený	[mm]
f_n max.	- posuv maximální	[mm]

$f_n \text{ min.}$	- posuv minimální	[mm]
v_c	- řezná rychlost	[mm.min ⁻¹]
v_f	- posuvová rychlost	[mm.min ⁻¹]
r_ϵ	- poloměr špičky nástroje	[mm.min ⁻¹]
α_r	- nástrojový úhel nastavení hlavního ostří.....	[°]
ψ_r	- doplňkový úhel nastavení hlavní řezné hrany	[°]
max	- maximální hodnota	[-]
min	- minimální hodnota.....	[-]

Úvod

V dnešní době je většina součástí vyráběna z kovových materiálů, proto technologie obrábění spadá k nejrozšířenějším technologiím vůbec. Technologie obrábění je neustále rozšiřována a zároveň se rozšiřují její možnosti. Důraz je kladen na efektivitu výroby, řezivost a trvanlivost nástroje. Dalším důležitým parametrem je snižování výrobních časů případně rychlá a efektivní výměna nástroje či použití správného procesního média. Nejdůležitějším parametrem je vhodně zvolený řezný nástroj, ten umožní vznik zcela nových přístupů k obrábění jako takovému. Při zvolení vhodného řezného nástroje je možno dosáhnout větší produktivity výroby, a dokonce i snížení nákladů na výrobu. Jedním novým způsobem obrábění je právě zpětné soustružení.

Strojní inženýři začali postupně objevovat potenciál podélného zpětného soustružení, kde nástroj začíná od sklíčidla a následně se spolu s odebíraným materiálem vzdaluje od zmiňovaného sklíčidla. V tom je hlavní rozdíl zpětného soustružení od běžného konvenčního podélného soustružení.

Pro zvýšení produktivity a ušetření nákladů, firma Sandvik Coromant CZ s. r. o. začala pracovat na vývoji technologie zpětného soustružení, kde tato metoda slibovala zvýšení produktivity až o 50 %. Metoda umožnila soustružit obrobek ve všech směrech a tím se došlo na razantní snížení výrobních časů a použití výrobních nástrojů. Společnosti Sandvik Coromant CZ s.r.o. se podařilo kontrolovat tvar třísky při zpětném soustružení a dále dospěli k řadám výhod, které tato technologie přináší. Jednou z výhod pro získání nižších nákladů je použití menšího úhlu nastavení hlavního ostří κ_r . Při stálém testování se podařilo dosáhnout další výhody a tou bylo zvýšení rychlosti posuvu až na dvojnásobek než při konvenčním podélném soustružení, a to vedlo také ke zvýšení řezné rychlosti.

Mým cílem bakalářské práce je stanovit opotřebení na čele, bříty nebo hřbetu destičky. Dalším krokem bude vyhodnocení silové analýzy případně drsnosti jednotlivých destiček a doporučení té nejvíce vhodné. Experiment se bude provádět na obráběcím centre CNC NLX 2500/700. Pro experiment byly stanoveny dva materiály s označením C45 a 1.4404. Oba materiály se budou testovat pro tři různé VBD. Každá destička se bude testovat pro čtyři různé posuvy a každý posuv se bude testovat pro čtyři různé řezné rychlosti.

1 Soustružení se zpětným posuvem

1.1 Historie firmy Sandvik Coromant CZ s.r.o.

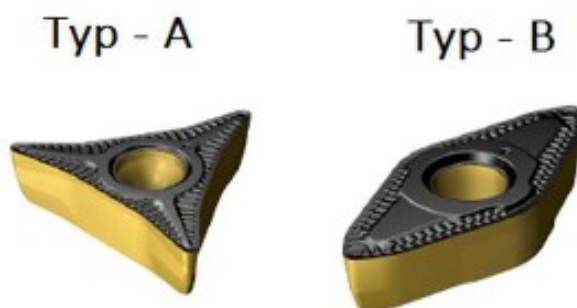
Historie firmy začíná již v roce 1942, kdy se firma poprvé začala zabývat výrobou nástrojů ze SK pod vedením prezidenta firmy Wihelma Haglunda. V roce 1969 se povedlo firmě vylepšit výkonnost břitových destiček, a to díky nově představenému povlaku Gamma neboli GC. Tím se také zlepšila tepelná vodivost.

V dnešní době je Sandvik světovým dodavatelem nástrojů pro oblast obrábění kovů. Stále vyvíjí a rozvíjí nové metody a produkty, kterými podporuje průmysl. Sandvik je vlastníkem přes 520 patentových řad. Zaměstnává přes 7900 zaměstnanců a to ve 150 zemích světa.¹

1.2 Problematika zpětného soustružení.

Jelikož se jedná o zcela novou technologii představenou společností Sandvik Coromant CZ s.r.o., nebylo možné najít jakékoliv poznatky či informace o této metodě obrábění jak na webových stránkách portálu Scopus, tak ani v univerzitní knihovně VŠB-TUO.

Pro navržení a odzkoušení nové technologie zpětného soustružení byly uvedeny na trh nové nástroje CoroTurn nesoucí název CoroTurn Prime typu A a B.³

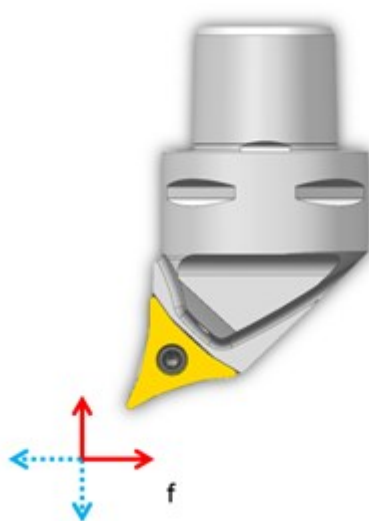


Obrázek 1 Typy vyměnitelných břitových destiček

Zdroj: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=cp-b1108-m5%204325>

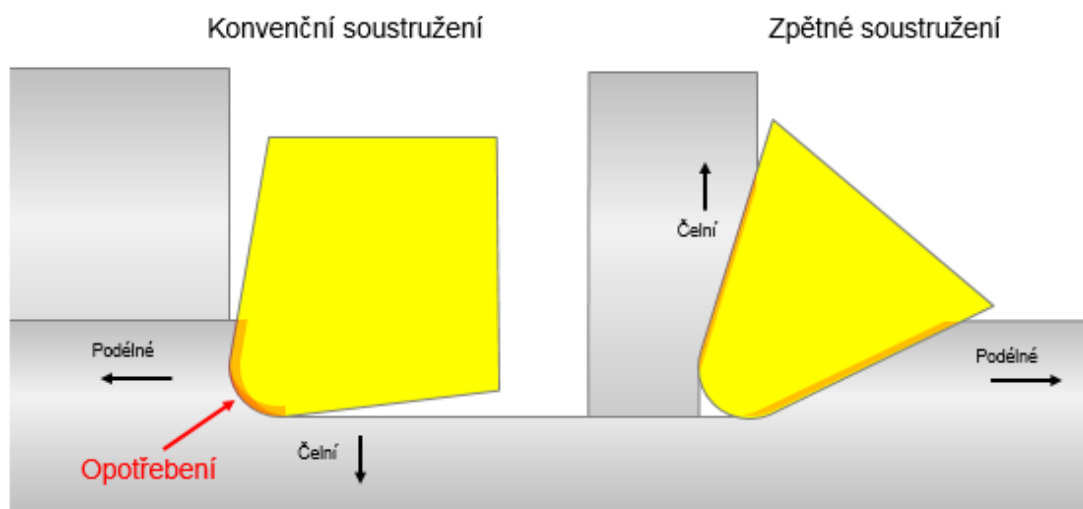
1.3 Popis technologie zpětného soustružení

Výrobce Sandvik Coromant CZ s.r.o. vyvinul technologii zpětného soustružení pro zvýšení produktivity a snížení nákladů na obrábění. Mimo jiné tato nová technologie vedla k lepšímu odvodu třísky z místa řezu a ke zlepšení kvality povrchu obrobku. Na obrázku 2 jsou znázorněny posuvy jak u konvenčního podélného soustružení, tak i posuvy zpětného soustružení. U zpětného soustružení jsou posuvy označeny červeně a u konvenčního podélného soustružení jsou posuvy označeny modře. U konvenčního podélného soustružení dochází k většímu opotřebení na špičce nástroje, zatímco u zpětného je opotřebení rovnoměrně rozloženo.²



Obrázek 2 Posuvy obou technologií

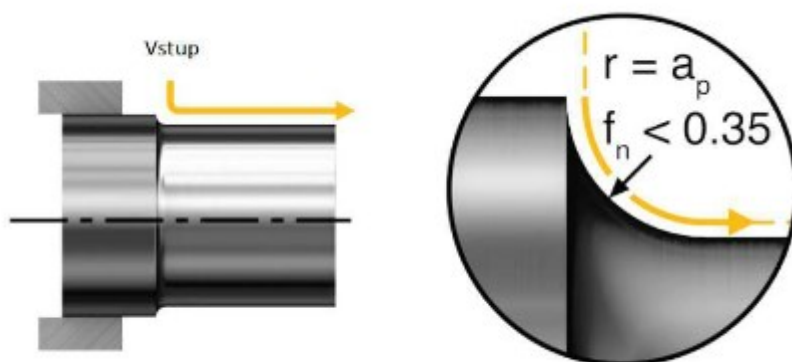
Zdroj:https://www.sandvik.coromant.com/cscz/campaigns/primeturning/Pages/default.aspx?internal_camplink=primeturning&internal_camplink_type=news#



Obrázek 3 Srovnání konvenčního a zpětného soustružení

Zdroj: https://www.sandvik.coromant.com/cs- cz/products/coroturn_prime/pages/how-to-use.aspx

Při technologii zpětného soustružení je výrobcem doporučeno vstupovat do materiálu vždy po kruhové dráze a se sníženým posuvem. A to z důvodu eliminace rázu do materiálu a tím snížení namáhání špičky nástroje. V průběhu celého záběru je také výrobcem doporučeno udržet konstantní tloušťku třísky.



Obrázek 4 Náběh nástrojů do záběru

Zdroj: https://www.sandvik.coromant.com/cs- cz/products/coroturn_prime/pages/how-to-use.aspx

Přívod procesního média do místa řezu je výrobcem doporučeno dvěma způsoby. Prvním způsobem je přívod procesního média shora. Ten má lepší vliv na tvorbu třísky. Druhým způsobem je přívod procesního média ze strany. To vede k dosažení delší životnosti nástroje.

1.4 Nástroje pro zpětné soustružení

Pro novou technologii bylo také nutné uvést na trh dva zcela nové nástroje zvané CoroTurn Prime typu A a B. Ve své podstatě se jedná pouze o dvě vyměnitelné břitové destičky, kde byla každá určená pro jiný druh obrábění. VBD je možné upnout ve stopkovém držáku.⁴

1.4.1 VBD typu A

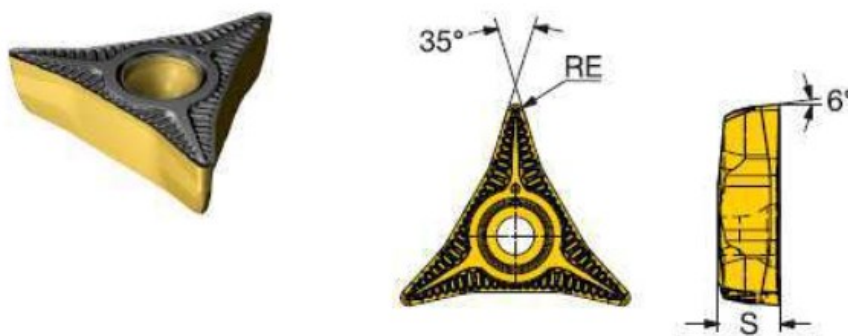
Vyměnitelná břitová destička typu A se vyznačuje třemi rohy neboli třemi řeznými břity pod úhlem 35°. Destičku je možné vyrábět ve třech různých třídách ocelí. A to jak v GC4325, GC2025 tak i v GC1115. Geometrie břitových destiček jsou L3, L5 a L5W. Destička je vhodná pro lehké hrubování, dokončování a tvarové obrábění. Zvyšuje produktivitu práce až o 56 %.

Třídy vyráběných VBD:

- GC4325 – je nástrojová třída,
 - materiál odolný vůči vysokým teplotám,
 - řezná hrana zůstává neporušena i při vysokých teplotách => vyšší řezná rychlost a spolehlivost.
- GC2025 – nástrojová třída s CVD povlakem,
 - vhodné pro polodokončovací i hrubovací operace,
 - odolnost vůči tepelným a mechanickým rázům.
- GC1115 – nástrojová třída s PVD povlakem,
 - určená pro korozivzdorné oceli,
 - pro upichovací, zapichovací a soustružnické operace,
 - odolnost proti působení tepla a plastické deformaci.

Podmínky obrábění	P	M	K	S	H
Dobré	GC4315	GC2220	H13A	GC1105	CB7115
Průměrné	GC4325	GC2025	H13A	GC1115	CB7125
Obtížné	GC4335	GC1125	H13A	GC1125	CB7125

Obrázek 5 třídy VBD



Obrázek 6 VBD typu A

Zdroj: <https://www.dgisupply.com/INTERSHOP/static>

Tab. 1: Doporučené hodnoty řezných parametrů pro VBD typu A

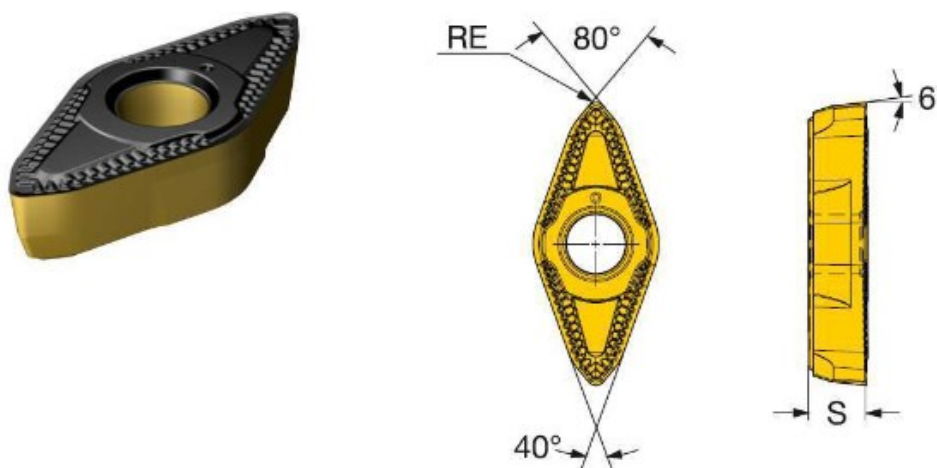
Parametry	SBW	EBW	SFW	EFW	
f_n min.	0,2	0,2	0,1	0,1	[mm]
f_n dop.	0,4	0,4	0,2	0,2	[mm]
f_n max.	0,5	0,5	0,25	0,25	[mm]
a_p min.	0,25	0,25	0,25	0,25	[mm]
a_p dop.	1,5	1,5	1	1	[mm]
a_p max.	3	2,5	1,5	1,5	[mm]
κ_r	30	25	115	120	[°]

1.4.2 VBD typu B

VBD typu B je tvořena dvěma rohy neboli dvěma nástrojovými břity. Úhel nastavení hlavního ostří κ_r je 25°. Destičku je možné vyrábět ve čtyřech různých třídách ocelí. A to jak v GC4325, GC2025, GC1115, tak v H13A. Geometrie břitových destiček jsou L4, L4W, H3, H3Wm M5 a M5W. Destička je vhodná pro těžké obrábění a zvyšuje produktivitu práce až o 85 %.

Třídy vyráběných VBD:

- GC4325 – viz výše
- GC2025 – viz výše
- GC1115 – viz výše
- H13A – Tvrdá nepovlakovaná nástrojová třída
 - Pro polodokončovací a hrubovací operace
 - Vhodná pro průměrné až stabilní podmínky
 - Vynikající kvalita obrobené plochy

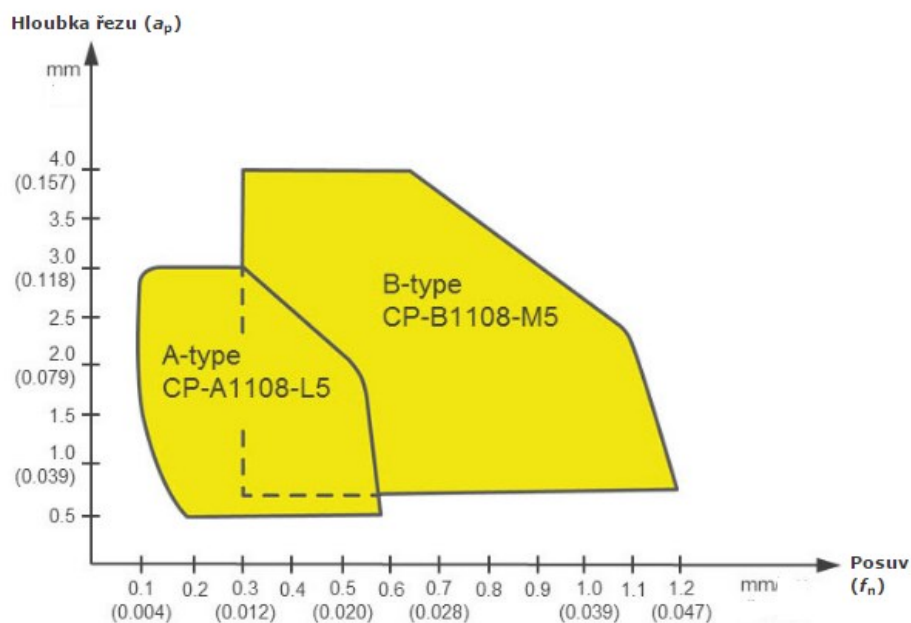


Obrázek 7 VBD typu B

Zdroj: <https://www.dgisupply.com/INTERSHOP/static>

Tab. 2: Doporučené hodnoty řezných parametrů pro VBD typu B

Parametr	SBW	EBW	SFW	EFW
f_n min. [mm]	0,3	0,3	0,2	0,2
f_n dop. [mm]	0,6	0,6	0,35	0,3
f_n max. [mm]	1,2	1,2	0,6	0,6
a_p min. [mm]	0,5	0,5	0,5	0,5
a_p dop. [mm]	2	1	2	2
a_p max. [mm]	4	1,5	3	3
κ_r [°]	25	25	95	95



Obrázek 8 Přípustní rozsah hodnot řezných parametrů pro nástroj typu A a B

Zdroj: https://www.sandvik.coromant.com/cscz/products/coroturn_prime/pages/how-to-use.aspx

1.4.3 Srovnání řezných podmínek

Technologie zpětného soustružení je vhodná pro soustružení těžkoobrobitelných materiálů dle normy DIN ISO 513. Dle normy se materiály dále dělí do šesti základních skupin – P, M, K, N, S₀, H. Z nichž pro zpětné soustružení jsou vhodné skupiny P, M, S₀.⁵

Kde, P – je skupina uhlíkových, legovaných nástrojových ocelí a korozivzdorných ocelí,

M – je skupina nerezových a žárupevných ocelí,

S₀ – je skupina superslitin a titanových slitin.

V Následujících tabulkách 3 až 5 je provedeno srovnání všech řezných parametrů jak mezi jednotlivými VBD typu A a B, tak také mezi zpětným a konvenčním soustružením.

Tab. 3: Řezné podmínky pro těžké hrubování

Skupina	Řezné podmínky	Konvenční obrábění	CoroTurn Prime A – type	CoroTurn Prime B – type
P	v_c [m.min ⁻¹]	330	-	350
	f_n [mm]	0,35	-	1,2
	a_p [mm]	4	-	3
M	v_c [m.min ⁻¹]	200	-	250
	f_n [mm]	0,35	-	1,20
	a_p [mm]	4	-	3
S	v_c [m.min ⁻¹]	60	-	100
	f_n [mm]	0,30	-	0,50
	a_p [mm]	2	-	2,5

Tab. 4: Řezné podmínky pro dokončování

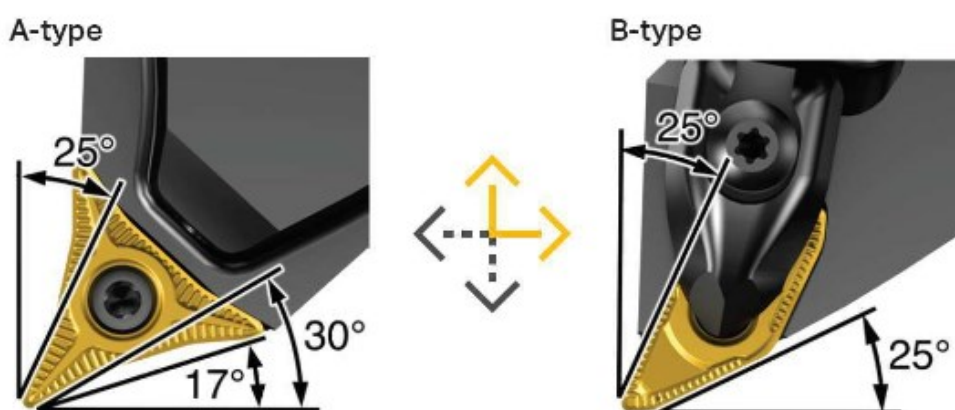
Skupina	Řezné podmínky	Konvenční obrábění	CoroTurn Prime A – type	CoroTurn Prime B – type
P	v_c [m.min ⁻¹]	300	350	350
	f_n [mm]	0,3	0,4	0,6
	a_p [mm]	2	2	2,5
M	v_c [m.min ⁻¹]	200	250	250
	f_n [mm]	0,3	0,4	0,6
	a_p [mm]	2	2	2,5
S	v_c [m.min ⁻¹]	60	100	100
	f_n [mm]	0,2	0,3	0,4
	a_p [mm]	1,5	1,5	2

Tab. 5: Řezné podmínky pro obrábění čelních ploch

Skupina	Řezné podmínky	Konvenční obrábění	CoroTurn Prime A – type	CoroTurn Prime B – type
P	v_c [m.min ⁻¹]	330	350	350
	f_n [mm]	0,35	0,5	1,2
	a_p [mm]	3	2,5	1,5
M	v_c [m.min ⁻¹]	200	250	250
	f_n [mm]	0,35	0,5	1,2
	a_p [mm]	3	2,5	1,5
S	v_c [m.min ⁻¹]	60	100	100
	f_n [mm]	0,3	0,35	0,5
	a_p [mm]	2	1,5	1,5

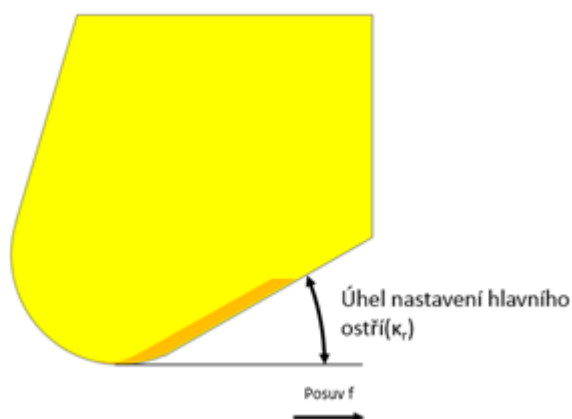
1.5 Geometrie břitu VBD

Malý úhel nastavení hlavního ostří κ_r , který je u VBD typu A 30° a u typu B 25° umožňuje při zpětném soustružení vytvářet tenčí a širší třísku. Dochází k rovnoměrnému mechanickému zatížení a tím se snižuje opotřebení špičky nástroje. Malý úhel nastavení hlavního ostří κ_r vede i k lepšímu odvodu tepla z místa řezu, delší životnosti nástroje a snížení vibrací při samotném procesu obrábění.⁶



Obrázek 9 Úhly nastavení pro typ VBD A a VBD B

Zdroj: https://www.sandvik.coromant.com/cscz/products/coroturn_prime/pages/how-to-use.aspx

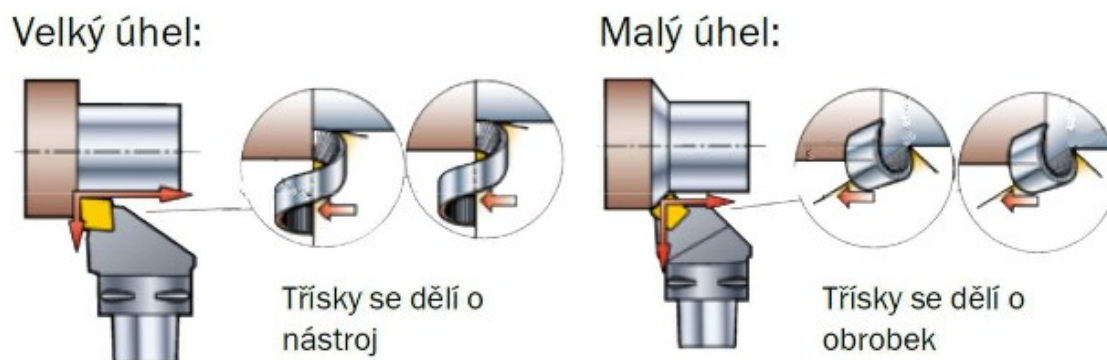


Obrázek 10 Zobrazení úhlu nastavení hlavního ostří

Zdroj: https://www.sandvik.coromant.com/cscz/products/coroturn_prime/Pages/default.asp

x

Při zpětném soustružení a malém úhlu nastavení se dělí tříska o obrobek a tím se zvyšuje trvanlivost nástroje. Při zpětném soustružení se výsledná řezná síla rozkládá jak do radiálního, tak i axiálního směru a může způsobit vibrace.



Obrázek 11 Dělení třísky

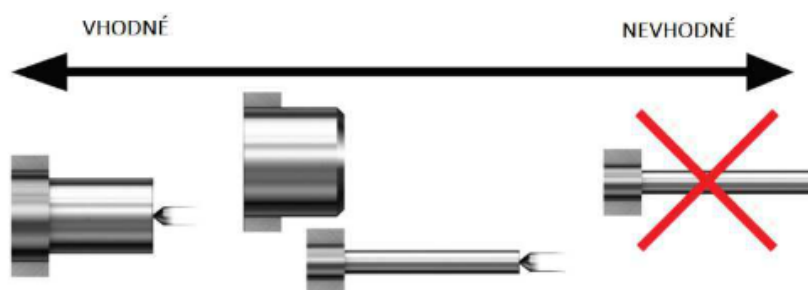
Zdroj: https://www.sandvik.coromant.com/cscz/products/coroturn_prime/Pages/default.asp
x

1.6 Použití zpětného soustružení

Zpětné soustružení můžeme využít při obrábění čelních, podélných tak i vnitřních ploch. Zpětné soustružení má uplatnění při hromadné výrobě.

1.6.1 Soustružení podélné plochy

Při podélném soustružení je vhodné volit kratší součásti. V případě delší součásti je doporučeno mít součást podepřenou kuželem či trnem, to platí i v případě obrábění štíhlých součástí.⁷

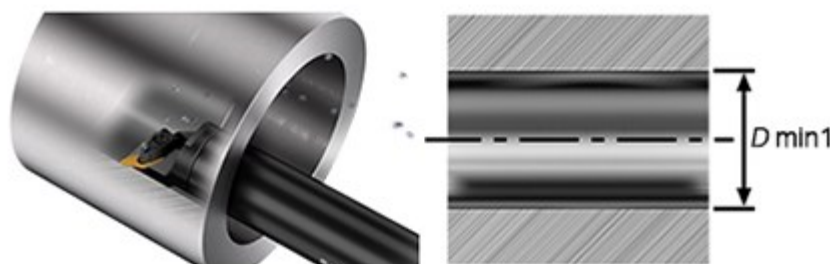


Obrázek 12 Vhodné polotovary pro podélné soustružení

Zdroj: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coroturn_prime/pages/how-to-use.aspx

1.6.2 Soustružení vnitřních ploch

Při zpětnou soustružení vnitřních ploch je zapotřebí speciální řezné hlavy zvané CoroTurn Prime SL. S touto hlavou se mohou soustružit průměry pouze větší jak 40 mm.

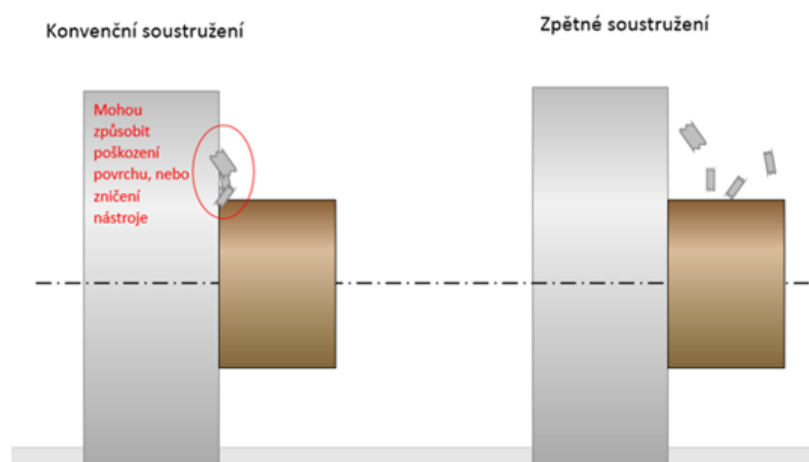


Obrázek 13 Soustružení vnitřního průměru

Zdroj: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coroturn_prime/pages/how-to-use.aspx

1.7 Odvod třísky z místa řezu

Při použití technologie zpětného soustružení se nástroj pohybuje opačným směrem než při konvenčním podélném soustružení, tj. od sklíčidla. Tím pádem nástroj odvádí třísku z místa řezu a nehromadí se u sklíčidla. Tak zamezíme případnému poškození povrchu obrobku či namotání třísky na nástroj a následné jeho poškození. Vhodné je taky dodržovat pokyny výrobce a stanovit předem doporučené řezné parametry.⁷



Obrázek 14 Odvod třísky z místa řezu

Zdroj:https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coroturn_prime/pages/how-to-use.aspx

1.8 Software

CoroPlus

Pro detailnější vykreslení dráhy nástroje můžeme použít free software od Sandviku Coromant CZ s.r.o. zvaný CoroPlus, který nám dokáže vytvořit jednotlivé programovací kódy a pracovní postupy, které nám zajistí dosažení maximální výkonnosti. Vykreslením pomocí dráhy softwaru získáme kratší výrobní časy a předejdeme tak případné kolizi nástroje. Software je kompatibilní s celou řadou obráběcích strojů.⁸

Mezi hlavní výhody patří:

- urychluje plánovací procesy a prováděné operace,
- zajistí správnou dráhu nástroje, nabízí optimální produktivitu,
- automatické ukládání navržených tvarů,
- dostupný jak na stolních zařízeních, tak i na mobilních zařízeních,
- uživatelsky komfortní rozhraní,
- možnost 3D simulace,
- připraví bezpečný vstup nástroje do obráběné součásti.



Obrázek 15 Software Coro plus

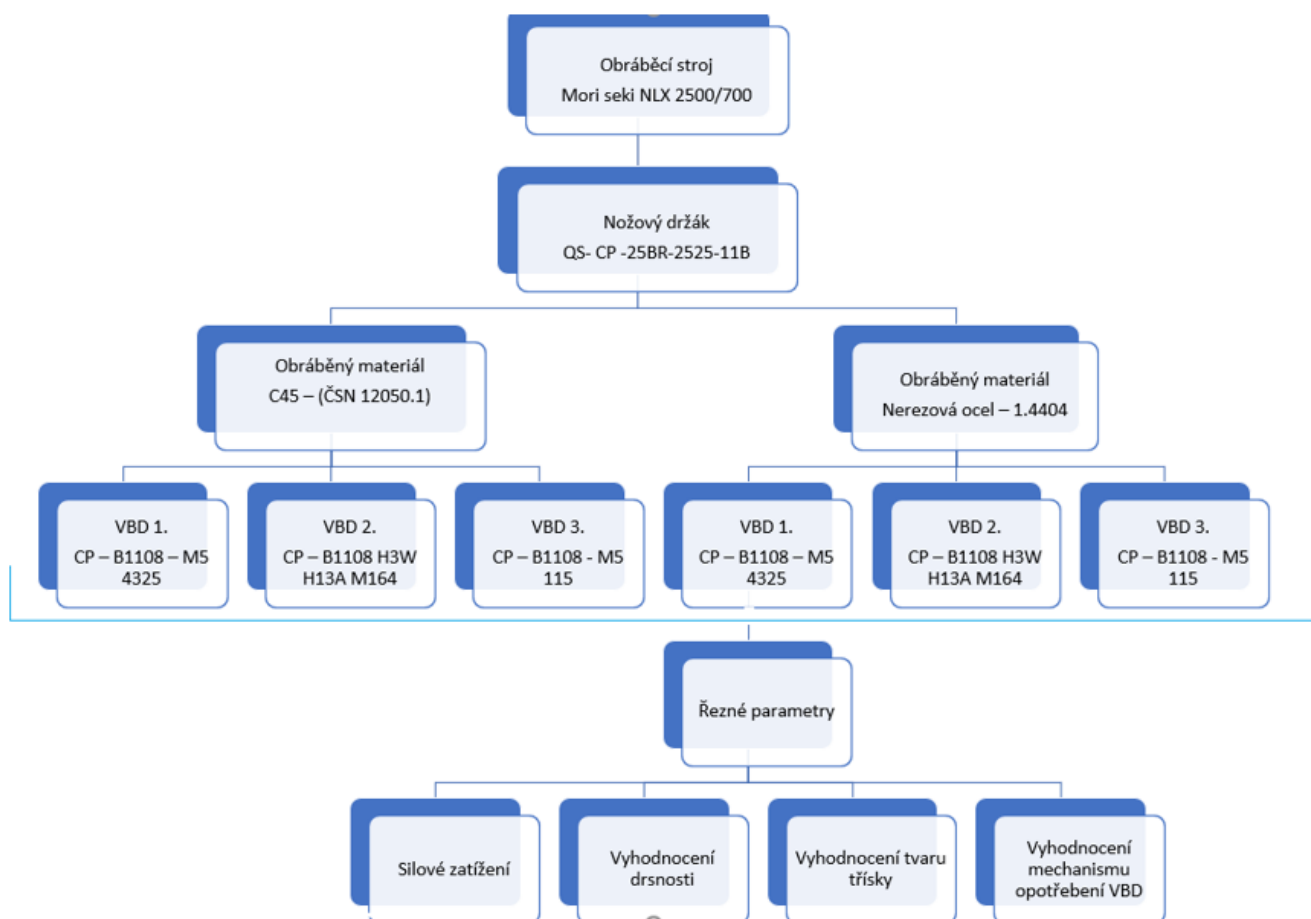
Zdroj:https://www.dgisupply.com/INTERSHOP/static/WFS/DGISupply-US-Site/-/DGISupply-US/en_US/Product%20Literature/pdfs/CoroTurn%20Prime%20-%20DGI-Groves.pdf

2 Návrh a příprava experimentu

Při procesu obrábění kovů břit nástroje vniká do obrobku a tím dochází k vytvoření požadovaného tvaru obrobku. Břit je vtlačován do povrchu součásti, kde vznikají elastické deformace, plastické deformace a po překonání meze pevnosti obráběného materiálu dojde k oddělení vrstvy materiálu ve formě třísky.

Mezi nejdůležitější charakteristické vlastnosti materiálu při technologii obrábění patří obrobitelnost materiálu. Obrobitelnost materiálu nám ovlivňuje celý proces obrábění. Má vliv na řeznou geometrii nástroje a volbu řezného materiálu. Teplo a řezné síly, které vznikají při procesu obrábění jsou ovlivňovány typem nástroje a jeho materiálem. Při obrábění je naší snahou odvést co nejvíce tepla z obrobku a nástroje pomocí třísky nebo procesní média. Odvod třísky a tím i tepla z místa řezu je ovlivněn vhodným utvařečem třísek a vhodnou řeznou geometrií nástroje. Teplo je odvedeno z místa řezu pomocí třísky, tím zamezíme přenosu tepla do nástroje či obrobku, kde by mohlo dojít ke značnému opotřebení ostří a ovlivnění jak mechanických, chemických, tak fyzikálních vlastností obrobku.

Návrh a realizace experimentální části bere v potaz pouze řezné a procesní parametry zpětného soustružení. Tyto řezné parametry nám ovlivňují výsledný povrch obrobku, trvanlivost nástroje tak i obrobitelnost materiálu. Řezné parametry zvolené při experimentu budou odpovídat pro využití v praxi.



Obrázek 16 Skutečné schéma experimentu

2.1 Obráběné materiály

Pro experimentu byly zvoleny dva materiály. Jako první materiál byla zvolena uhlíková ocel C45 (označení dle ČSN 12 050.1), o výchozích rozměrech $\varnothing 93 \times 300$ mm.

Druhým materiálem byla zvolena korozivzdorná ocel 1.4404, o výchozích rozměrech $\varnothing 189 \times 90$ mm.

2.1.1 Uhlíková ocel C45 (ČSN 12 050.1)

Uhlíková ocel je nejvíce využívána u středně namáhaných strojních součástí, zejména u hřídelí, ozubených kol, ojnic, šneků apod. Dále je vhodná pro povrchové kalení a zušlechťování. Materiálu je přiřazena třída obrobiteľnosti 14b.⁹

Tab. 6: Chemické složení oceli C45

Prvek	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]	P [%]	S [%]
Hmotnostní zastoupení	0,42 až 0,50	0,5 až 0,8	0,17 až 0,37	Max. 0,25	Max. 0,3	Max. 0,3	Max. 0,04	Max. 0,04

Tab. 7: Mechanické vlastnosti oceli C45

Mez kluzu	$R_{p0,2}$ [MPa]	325
Mez pevnosti	R_m [MPa]	540
Tažnost	A [%]	Min. 17
Tvrđost	[HB]	Max. 225
Modul pružnosti v tahu	E [GPa]	211
Modul pružnosti ve smyku	G [GPa]	79

2.1.2 Korozivzdorná ocel 1.4404 (ČSN 17. 349)

Korozivzdorná ocel je nejvíce používaná ve výrobě tlakových nádob a součástí v chemickém, potravinářském a farmaceutickém průmyslu, kde se vyžaduje odolnost proti neoxidickým kyselinám nebo vysoká čistota produktu, zejména na svařované díly. Ocel je odolná vůči mezikrystalové korozi a plošné korozi. Ocel má zaručenou svařitelnost a je vhodná pro tváření za studena.¹⁰

Tab. 8: Chemické složení oceli 1.4404

Prvek	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	P [%]	S [%]
Hmotnostní zastoupení	Max. 0,03	Max. 0,2	Max. 1	16,5 až 18,5	10 až 13	2 až 2,5	Max. 0,045	Max. 0,03

Tab. 9: Mechanické vlastnosti oceli 1.4404

Mez kluzu	R _{p0,2} [MPa]	Min. 170
Mez pevnosti	R _m [MPa]	Min. 485
Tažnost	A [%]	Min. 40 %
Tvrlost	[HB]	Max. 217

2.2 Obráběcí stroj

Experiment byl prováděn v laboratoři CPIT, která náleží VŠB - TUO, která je součástí pracoviště Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Experiment byl prováděn na CNC soustružnickém stroji NLX 2500/700. Tento stroj je dostatečně tuhý a výkonný pro provedení experimentu zpětného soustružení.¹¹

Tab. 10: Parametry obráběcího stroje NLX 2500/700

Pracovní rozsah	Oběžný průměr nad ložem	787	mm
	Maximální soustružená délka	705	mm
	Maximální průměr obrobku	366	mm
	Rozsah délky v ose X	260	mm
	Rozsah délky v ose Z	795	mm
Vřeteno	Rozsah otáček	0–4000	min ⁻¹
	Výkon vřetene	18,5	kW
Nástroje	Počet nástrojů	12	ks
	Počet poháněných nástrojů	3	ks
	Výkon poháněných nástrojů	5,5	kW
Posuvové pohony	Rychloposuv	30 000	mm



Obrázek 16 Obráběcí stroj NLX 2500MC/700

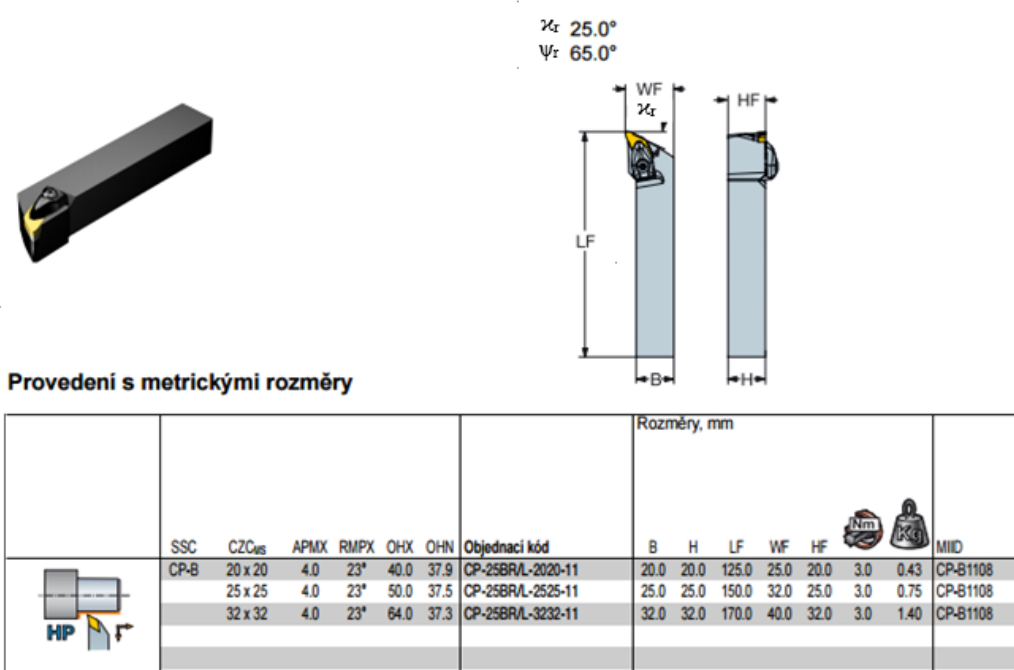
2.2.1 Procesní médium

Experiment testu VBD byl proveden bez použití chlazení, ale obráběcí stroj je vybaven externím chlazením. Kde se jako procesní médium používá chladicí a mazací roztok

Decocut 1040 dodávaný firmou Decoil. Splňuje veškeré nároky pro těžké obrábění a je možné ho mísit s vodou.¹²

2.2.2 Nástrojový držák pro vyměnitelné břitové destičky

V experimentu jsem testoval vyměnitelné břitové destičky typu B. Pro experiment byl použit nástrojový držák pro VBD typu B s pevnou upínkou označen jako Coro Turn Prime QS-CP-25BR-2525-11B. Držák byl vyroben firmou Sandvik Coromant CZ s. r. o.. Držák VBD je opatřen systémem pro vnitřní přívod procesního média.¹³



Obrázek 17 Držák VBD typu B

Zdroj: https://www.sandvik.coromant.com/cscz/products/qs_holding_system/pages/default.aspx



Obrázek 18 Držák VBD typu B s pevnou upínkou

2.2.3 Použité vyměnitelné břitové destičky

V experimentu byly testovány tři vyměnitelné břitové destičky typu B, které byly dodány přímo výrobcem nástroje. Destičky nesou označení dle normy ISO: CP – B1108 – M5 1115, CP – B1108 – M5W 4325 a CP – B1108 – H3W H13A. VBD jsou vyrobeny ze slinutého karbidu pro obrábění austenitických, korozivzdorných, žáru pevných, žáruvzdorných a feriticko – austenitických ocelí.

a) Materiál VBD

Testované VBD se skládají ze základního materiálu HC nebo HW. Zpravidla se jedná o směs slinutého karbidu, kde přesné složení výrobce neuvádí.¹⁴

b) Povlaky jednotlivých VBD

VBD označována jako CP – B1108 – M5W 4325. Destička je upravena technologií CVD. Jedná se o chemický nános povlaku na VBD o chemickém složení $\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$. Jeho dostatečná tvrdost zajišťuje odolnost proti opotřebení otěrem, což má za následek menší opotřebení hřbetu VBD. Základním materiálem je HC.

Druhá VBD označována jako CP – B1108 – M5 1115 je upravena technologií PVD. Jedná se o fyzické povlakování, kde povlak obsahuje chemické složení $\text{TiAlN} + \text{AlCr}_2\text{O}_3$. Titan aluminium nitrid se vyznačuje vysokou tvrdostí v kombinaci s vysokou odolností proti oxidaci, což vede k celkovému zvýšení odolnosti proti opotřebení. Základním materiálem je HC.

Poslední VBD označována jako CP – B1108 – H3W H13A. Základní materiál destičky je HW. Tato VBD není povlakovaná.

Tab. 11: Značení a vlastnosti VBD typu B

Typ destičky	CP – B1108 – M5 4325	CP – B1108 – M5 1115	CP – B1108 – H3W H13A
Typ operace	Střední	Střední	Střední
Průměr vepsané kružnice	11 mm	11 mm	11 mm
Poloměr špičky r_ε	0,794 mm	0,794 mm	0,794 mm
Základní materiál	HC	HC	HW
Povlak	CVD Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN	PVD TiAlN+AlCr ₂ O ₃	-
Tloušťka destičky	5 mm	5 mm	5 mm
Úhel hřbetu v rovině ortogonální	6 °	6 °	6 °

2.3 Dynamometr

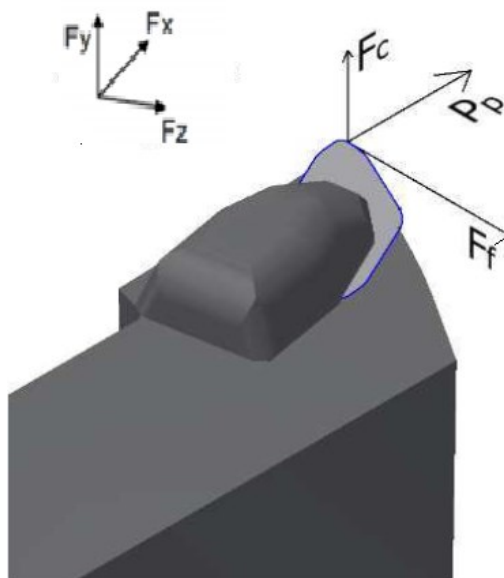
Pro zaznamenání sil během experimentu byl použit piezoelektrický dynamometr od firmy Kistler Eastern Europe s. r. o. Toto zařízení se běžně využívá pro měření rezných podmínek na CNC centrech apod.. Dynamometr využívá pro snímání deformace piezoelektrického jevu, který je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení.¹⁵

Základem dynamometru je destička upevněna k držáku nesoucí označení 9129A pro revolverové hlavy soustruhu a měřicí krystal. Na kterém vzniká náboj elektrických částic, který je přímo úměrný velikosti působící síly. S poklesem zatížení se lineárně síla snižuje, dokud není zatížení nulové. Měřicí čidlo měří síly ve směru x – y – z, značených jako F_x , F_y a F_z (směr složek sil neodpovídá složkám rezné síly a konvencím znázornění sil). Kladná hodnota tří základních směru sil F_c , F_f , a F_p je uvedena na růžici obr. 19.

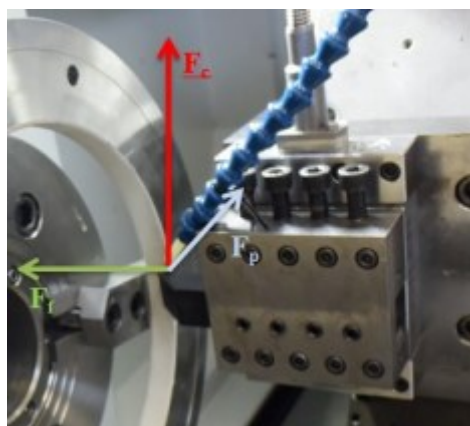
K vyhodnocení zatížení slouží program DynoWare, který umožní vykreslení průběhu všech řezných sil do grafu.

Tab. 12: Parametry dynometru

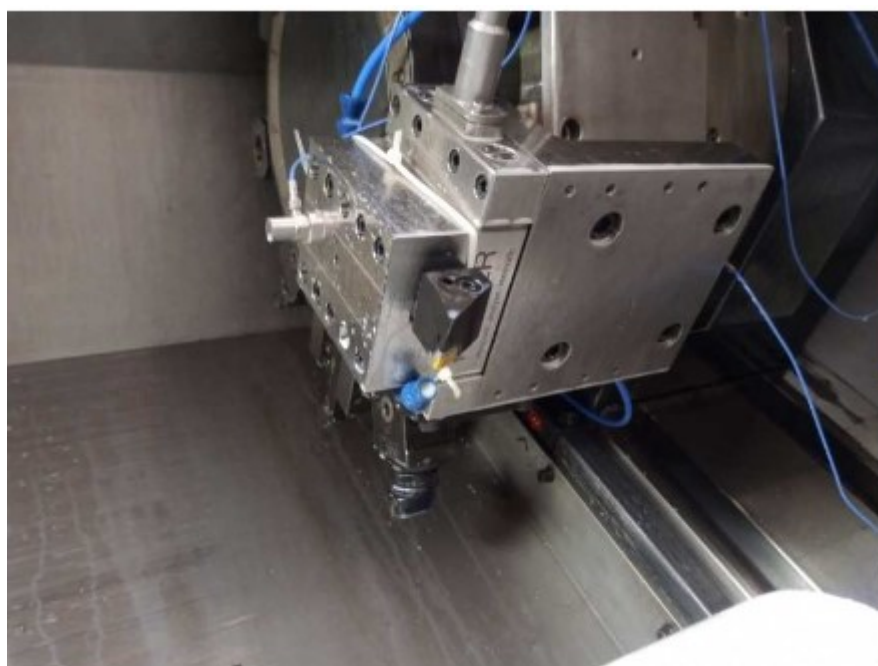
Funkce	Parametry
Měřicí rozsah F_x , F_y , F_z	-10–10 kN
Citlivost F_x , F_z	$\approx -8 \text{ pC} \cdot \text{N}^{-1}$
Citlivost F_y	$\approx -4,1 \text{ pC} \cdot \text{N}^{-1}$
Vlastní frekvence f_{nx}	$\approx 3,5 \text{ kHz}$
Vlastní frekvence f_{ny}	$\approx 4,5 \text{ kHz}$
Vlastní frekvence f_{nz}	$\approx 3,5 \text{ kHz}$
Teplotní pracovní rozsah	0–70 °C
Hmotnost	3,2 kg
Rozměry (délka; šířka; výška)	90; 105; 32 mm



Obrázek 19 Řezné síly v procesu soustružení



Obrázek 20 Třísložkový stacionární dynamometr

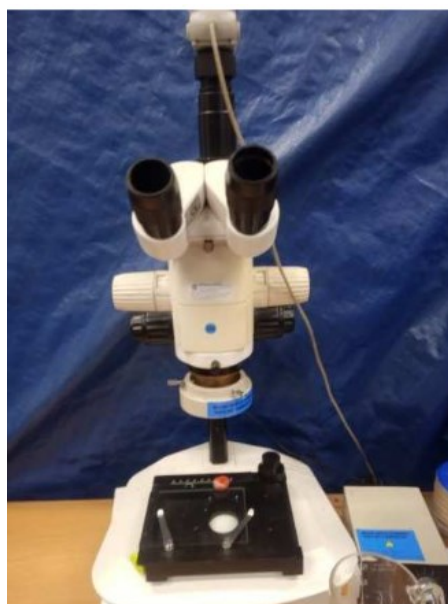


Obrázek 21 Dynometr – snímač a držák

2.4 Mikroskop pro měření VBD

Po každém řezném procesu docházelo k měření opotřebení VBD, aby se zjistila největší míra opotřebení. Měřilo se opotřebení hřbetu a čela. Jako opotřebení hřbetu bylo možné považovat zbarvení hřbetu a ztráty povlaku způsobené tepelným účinkem nebo otěrem. Předpokladem opotřebení plochy čela bylo vytvoření žlábků na čele o šířce KB a délce. Žlábků bylo možné brát jako kritérium opotřebení. Měření bylo provedeno pomocí mikroskopu napojeného na počítačový program zvaný Motic Image Plus 2, vyrobený firmou

Intraco Micro, spol. s r. o., který má ve vlastnictví Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie.¹⁶



Obrázek 22 Dílenský mikroskop

2.5 Přístroj sloužící k měření drsnosti povrchu

K experimentu jsem použil přístroj od firmy Mitutoyo konkrétně typ SJ – 210. Drsnost obrobeného povrchu byla zkoumána dle normy ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 25178-2:2012.¹⁷

Tab. 13: Parametry Mitutoyo SJ – 210

Snímací dotek	Diamantový hrot	-
Úhel snímacího hrotu	60	°
Poloměr snímacího hrotu	2	μm
Hmotnost	0,5	kg
Příčný směr	16	mm
Rozsah měření	360	μm



Obrázek 23 Mitutoyo SJ – 210

Zdroj: [https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/1292249246959/Surftest%20SJ-210/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/178-560-01D/index.xhtml?jsessionid=AB2E1618CD2F71AD0DB8356771B0BA3A](https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/1292249246959/Surftest%20SJ-210/$catalogue/mitutoyoData/PR/178-560-01D/index.xhtml?jsessionid=AB2E1618CD2F71AD0DB8356771B0BA3A)

3 Provedení experimentální části

Během experimentu jsem testoval opotřebení u třech typů vyměnitelných břitových destiček na dvou různých materiálech. Každá destička byla testována při čtyřech různých posuvech a každému posuvu náležely čtyři různé řezné rychlosti. Pro ocel byla délka obrobku 50 mm a u korozi-vzdorné oceli, kde se předpokládalo s horšími řeznými podmínkami, byla délka obrobku stanovena na 25 mm. Hloubka řezu byla vždy konstantní, tj. 2 mm. Experiment byl prováděn bez procesního média, aby nedošlo k poškození dynamometru kapalinou.

Průběh měření jedné VBD:

Ve fázi bylo nutné vhodně zvolený polotovár upnout do sklíčidla a podepřít koníkem, aby se zamezilo průhybu a vibracím během obrábění. Následně se povrch obrobku orovnal. Následovalo nastavení souřadného systému a vymezení dráhy u CNC stroje. V programu DynoWare jsem provedl nastavení prvního měření a dopsání vhodných parametrů tj: řezné rychlosti, posuvu a materiálu. Dalším krokem bylo spuštění celého řezného procesu tak měřicího. Následoval náběh nástroje do obrobku za snížených řezných podmínek, a to jak posuvu i řezné rychlosti. Po stabilizaci řezných podmínek dochází k nárustu posuvu, řezné rychlosti a obrábění po celé stanovené délce obrobku. Následovalo pozastavení měřicího programu a následný zápis hodnot do excelu a uložení grafu. Nakonec byla změřena drsnost povrchu Ra a Rz. V poslední fázi byl zhotoven snímek opotřebení destičky.

Pro experiment byla stanovena maximální řezná síla ve všech směrech na 8 000 N pro oba materiály, aby nedošlo k poškození měřicího zařízení dynamometru. Dvě ze tří destiček (jedná se o: CP – B1108 – H3W – H13A a CP-B1108 – M5 1115) u materiálu 12.050 přesáhly tuto maximální hranici, proto bylo provedeno snížení řezných rychlostí u oceli oproti destičce CP – B1108 – M5 4325. Posuvy a ostatní podmínky byly zachovány. Viz tab. 15, 16. V průběhu experimentu hlavně u materiálu 1.4404 bylo častokrát měření ukončeno předčasně z důvodu dosažení vysokých řezných sil.

Měření č.1 na mat. C45 s použitou VBD CP – B1108 – M5 4325

Tab. 14: Nastavené řezné parametry zpětného soustružení při testování VBD CP-B1108-M54325

Pořadí	Obráběný materiál	Označení	a_p [mm]	f [mm]	v_c [m*min ⁻¹]
1	C45	CP – B1108 – M5 4325	2	0,6	200
2	C45	CP – B1108 – M5 4325	2	0,6	250
3	C45	CP – B1108 – M5 4325	2	0,6	275
4	C45	CP – B1108 – M5 4325	2	0,6	300
5	C45	CP – B1108 – M5 4325	2	0,8	200
6	C45	CP – B1108 – M5 4325	2	0,8	250
7	C45	CP – B1108 – M5 4325	2	0,8	275
8	C45	CP – B1108 – M5 4325	2	0,8	300
9	C45	CP – B1108 – M5 4325	2	1	200
10	C45	CP – B1108 – M5 4325	2	1	250
11	C45	CP – B1108 – M5 4325	2	1	275
12	C45	CP – B1108 – M5 4325	2	1	300
13	C45	CP – B1108 – M5 4325	2	1,2	200
14	C45	CP – B1108 – M5 4325	2	1,2	250
15	C45	CP – B1108 – M5 4325	2	1,2	275
16	C45	CP – B1108 – M5 4325	2	1,2	300

Měření č. 2 na mat. C45 s použitou VBD CP – B1108 – M5 1115

Tab. 15: Nastavené řezné parametry zpětného soustružení při testování VBD CP-B1108-M5 1115

Pořadí	Obráběný materiál	Označení	a_p [mm]	f [mm]	v_c [m*min ⁻¹]	Poznámka
17	C45	VBD CP – B1108 – M5 1115	2	0,6	120	
18	C45	VBD CP – B1108 – M5 1115	2	0,6	145	
19	C45	VBD CP – B1108 – M5 1115	2	0,6	180	
20	C45	VBD CP – B1108 – M5 1115	2	0,6	210	
21	C45	VBD CP – B1108 – M5 1115	2	0,8	120	
22	C45	VBD CP – B1108 – M5 1115	2	0,8	145	
23	C45	VBD CP – B1108 – M5 1115	2	0,8	180	
24	C45	VBD CP – B1108 – M5 1115	2	0,8	210	
25	C45	VBD CP – B1108 – M5 1115	2	1	120	
26	C45	VBD CP – B1108 – M5 1115	2	1	145	
27	C45	VBD CP – B1108 – M5 1115	2	1	180	
28	C45	VBD CP – B1108 – M5 1115	2	1	210	Měření ukončeno

Měření č. 3 na mat. C45 s použitou VBD CP – B1108 – H3W H13A

Tab. 16: Nastavené řezné parametry zpětného soustružení při testování VBD CP-B1108-H3W H13A

Pořadí	Obráběný materiál	Označení	a_p [mm]	f [mm]	v_c [m*min ⁻¹]	Poznámka
29	C45	VBD CP – B1108 – H3W H13A	2	0,6	120	
30	C45	VBD CP – B1108 – H3W H13A	2	0,6	145	
31	C45	VBD CP – B1108 – H3W H13A	2	0,6	180	
32	C45	VBD CP – B1108 – H3W H13A	2	0,6	210	
33	C45	VBD CP – B1108 – H3W H13A	2	0,8	120	
34	C45	VBD CP – B1108 – H3W H13A	2	0,8	145	
35	C45	VBD CP – B1108 – H3W H13A	2	0,8	180	
36	C45	VBD CP – B1108 – H3W H13A	2	0,8	210	
37	C45	VBD CP – B1108 – H3W H13A	2	1	120	
38	C45	VBD CP – B1108 – H3W H13A	2	1	145	Vylomení bříty
39	C45	VBD CP – B1108 – H3W H13A	2	1	180	
40	C45	VBD CP – B1108 – H3W H13A	2	1	210	
41	C45	VBD CP – B1108 – H3W H13A	2	1,2	120	
42	C45	VBD CP – B1108 – H3W H13A	2	1,2	145	
43	C45	VBD CP – B1108 – H3W H13A	2	1,2	180	
44	C45	VBD CP – B1108 – H3W H13A	2	1,2	210	

Měření č.4 na mat. 1.4404 s použitou VBD CP – B1108 – M5 4325

Tab. 17: Nastavené řezné parametry zpětného soustružení při testování VBD CP-B1108-M5 4325

Pořadí	Obráběný materiál	Označení	a_p [mm]	f [mm]	v_c [m*min ⁻¹]
45	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 4325	2	0,6	110
46	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 4325	2	0,6	140
47	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 4325	2	0,6	170
48	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 4325	2	0,6	200
49	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 4325	2	0,8	110
50	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 4325	2	0,8	140
51	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 4325	2	0,8	170
52	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 4325	2	0,8	200
53	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 4325	2	1	110
54	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 4325	2	1	140
55	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 4325	2	1	170
56	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 4325	2	1	200

Měření č.5 na mat. 1.4404 s použitou VBD CP – B1108 – M5 1115

Tab. 18: Nastavené řezné parametry zpětného soustružení při testování VBD CP-B1108-M5 -1115

Pořadí	Obráběný materiál	Označení	a_p [mm]	f [mm]	v_c [m*min ⁻¹]
57	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 115	2	0,6	110
58	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 115	2	0,6	140
59	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 115	2	0,6	170
60	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 115	2	0,6	200
61	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 115	2	0,8	110
62	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 115	2	0,8	140
63	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 115	2	0,8	170
64	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 115	2	0,8	200
65	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 115	2	1	110
66	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 115	2	1	140
67	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 115	2	1	170
68	1.4404	VBD CP – B1108 – M5 115	2	1	200

Měření č. 6 na mat. 1.4404 s použitou VBD CP – B1108 – H3W H13A

Tab. 19: Nastavené řezné parametry zpětného soustružení při testování VBD CP-B1108-H3W H13A

Pořadí	Obráběný materiál	Označení	a_p [mm]	f [mm]	v_c [m*min ⁻¹]
69	1.4404	VBD CP – B1108– H3W H13A	2	0,6	110
70	1.4404	VBD CP – B1108– H3W H13A	2	0,6	140
71	1.4404	VBD CP – B1108– H3W H13A	2	0,6	170
72	1.4404	VBD CP – B1108– H3W H13A	2	0,6	200
73	1.4404	VBD CP – B1108– H3W H13A	2	0,8	110
74	1.4404	VBD CP – B1108– H3W H13A	2	0,8	140
75	1.4404	VBD CP – B1108– H3W H13A	2	0,8	170
76	1.4404	VBD CP – B1108– H3W H13A	2	0,8	200
77	1.4404	VBD CP – B1108– H3W H13A	2	1	110
78	1.4404	VBD CP – B1108– H3W H13A	2	1	140
79	1.4404	VBD CP – B1108– H3W H13A	2	1	170
80	1.4404	VBD CP – B1108– H3W H13A	2	1	200

4 Měření opotřebení řezného nástroje po aplikaci zpětného soustružení


Z určitých snímků pořízených mikroskopem bylo možné určit opotřebení vyměnitelné břitové destičky při soustružení se zpětným posuvem. Celý experiment byl prováděn bez procesního média. Snímky byly následně uvedeny do tabulky.

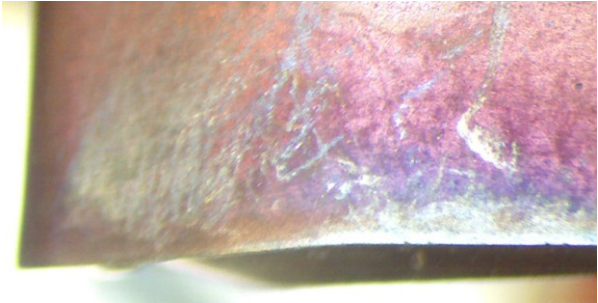

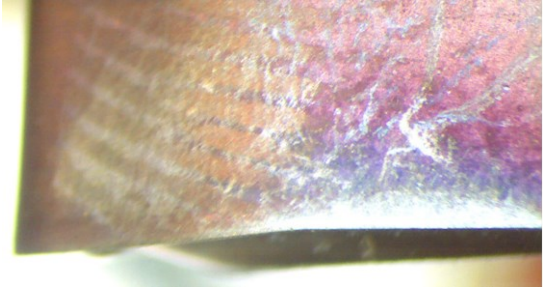

4.1 Měření opotřebení VBD CP – B1108 – M5 4325

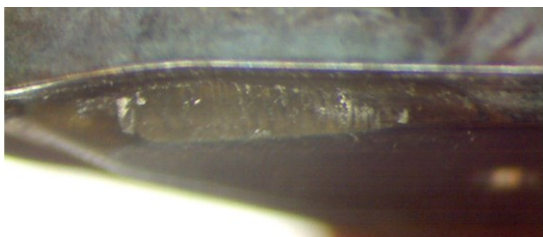
a) Ocel C45

U VBD typu CP – B1108 – M5 4325 lze pozorovat v oblasti plochy hřbetu pouhé zbarvení způsobeno tepelným účinkem a otěrem vzniklým při soustružení. Tohle opotřebení není možné použít v praxi jako kritérium opotřebení. Na špičce nástroje nedocházelo k plastické deformaci, která běžně vzniká při vnikání břitu do obrobku. Na čele nástroje vznikl žlábek o délce 2,93 mm a šířce KB = 0.93 mm. Žlábek vznikl v důsledku chemické reakce mezi VBD a materiálem obrobku. Při soustružení pomocí VBD CP – B1108 – M5 – 4325 by byla v praxi délka a šířka brána jako kritérium opotřebení.

Tab. 20: Opotřebení VBD CP – B 1108 – M5 4325 pro ocel C45

Řezné parametry	Měřená plocha
Měření: 1 f = 0,6 mm a _p = 2 mm v _c = 200 m.min ⁻¹	Plocha hřbetu 

Řezné parametry	Měřená plocha
<p>Měření: 3</p> <p>$f = 0,6 \text{ mm}$</p> <p>$a_p = 2 \text{ mm}$</p> <p>$v_c = 275 \text{ m.min}^{-1}$</p>	<p>Plocha hřbetu</p> 
<p>Měření: 6</p> <p>$f = 0,8 \text{ mm}$</p> <p>$a_p = 2 \text{ mm}$</p> <p>$v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$</p>	<p>Plocha hřbetu</p> 
<p>Měření: 9</p> <p>$f = 1 \text{ mm}$</p> <p>$a_p = 2 \text{ mm}$</p> <p>$v_c = 210 \text{ m.min}^{-1}$</p>	<p>Plocha hřbetu</p> 
<p>Měření: 12</p> <p>$f = 1 \text{ mm}$</p> <p>$a_p = 2 \text{ mm}$</p> <p>$v_c = 300 \text{ m.min}^{-1}$</p>	<p>Plocha čela</p> 

Řezné parametry	Měřená plocha
Měření: 15 $f = 1,2 \text{ mm}$ $a_p = 2 \text{ mm}$ $v_c = 275 \text{ m.min}^{-1}$	<p>Plocha čela</p> 

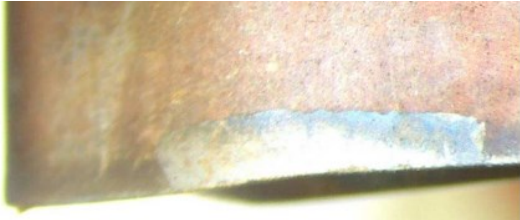
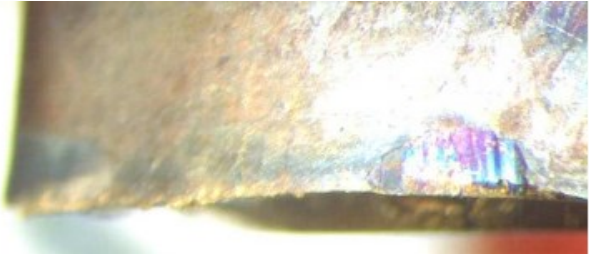

b) Korozivzdorná ocel 1.4404

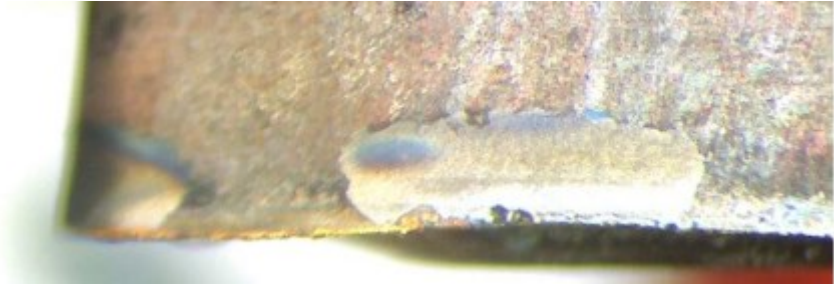
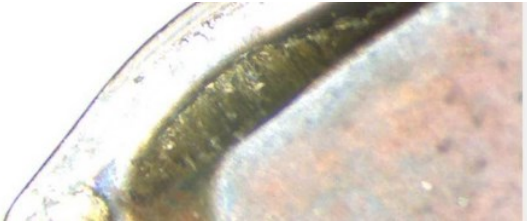
Při obrábění korozivzdorné oceli 1.4404 docházelo k rychlejšímu opotřebení destičky než u materiálu C45. Při řezné rychlosti $v_c = 200 \text{ m.min}^{-1}$ a posuvu $f = 0,6 \text{ mm}$ se projevilo opotřebení na ploše hřbetu o šířce $VB_{\max} = 0,13 \text{ mm}$. Konečné opotřebení hřbetu bylo o šířce $VB_{\max} = 0,43 \text{ mm}$. Dále došlo k mírné deformaci na špičce nástroje. Opotřebení na čele bylo ve tvaru žlábků o délce $3,75 \text{ mm}$ a šířce $KB = 0,91 \text{ mm}$. Jako kritérium opotřebení v praxi by bylo možné vzít opotřebení hřbetu VB_{\max} tak i délku a šířku KB žlábků na čele nástroje.



Obrázek 24 Neporušený břit destičky CP - B 1108 - M5 4325

Tab. 21: Opotřebení VBD CP – B 1108 – M5 4325 pro korozivzdornou ocel 1.4404

Řezné parametry	Měřená plocha
Měření: 45 $f = 0,6 \text{ mm}$ $a_p = 2 \text{ mm}$ $v_c = 110 \text{ m.min}^{-1}$	<p>Plocha hřbetu</p> 
Měření: 48 $f = 0,6 \text{ mm}$ $a_p = 2 \text{ mm}$ $v_c = 200 \text{ m.min}^{-1}$	<p>Plocha hřbetu</p> 
Měření: 51 $f = 0,8 \text{ mm}$ $a_p = 2 \text{ mm}$ $v_c = 170 \text{ m.min}^{-1}$	<p>Plocha hřbetu</p> 




Řezné parametry	Měřená plocha
Měření: 54 $f = 1 \text{ mm}$ $a_p = 2 \text{ mm}$ $v_c = 140 \text{ m.min}^{-1}$	<p data-bbox="839 394 1023 427">Plocha hřbetu</p>  <p data-bbox="858 786 1003 819">Plocha čela</p> 

4.2 Měření opotřebení VBD CP – B1108 – M5 1115

a) Ocel C45

Jedná se o stejné obrábění akorát za snížených řezných rychlostí, protože hodnota řezné složky F_c výsledné síly byla příliš vysoká a při pokračování hrozilo přetížení měřicí soustavy. Proto byl interval řezných rychlostí snížen na $<120;210> \text{ m.min}^{-1}$. Na čele v místě utvářeče třísky se vytvořil žlábek o délce 3,06 mm a šířce $KB = 0,74 \text{ mm}$. V praxi jako kritérium opotřebení by bylo možné brát délku a šířku žlábků na ploše čela VBD.

Tab. 22: Opotřebení VBD CP – B 1108 – M5 1115 pro ocel C45

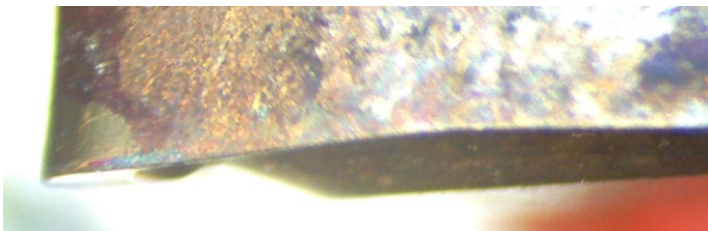
Řezné parametry	Měřená plocha
<p>Měření: 17</p> <p>$f = 0,6 \text{ mm}$</p> <p>$a_p = 2 \text{ mm}$</p> <p>$v_c = 120 \text{ m.min}^{-1}$</p>	<p>Plocha hřbetu</p> 
<p>Měření: 20</p> <p>$f = 0,6 \text{ mm}$</p> <p>$a_p = 2 \text{ mm}$</p> <p>$v_c = 210 \text{ m.min}^{-1}$</p>	<p>Plocha hřbetu</p> 
<p>Měření: 23</p> <p>$f = 0,8 \text{ mm}$</p> <p>$a_p = 2 \text{ mm}$</p> <p>$v_c = 180 \text{ m.min}^{-1}$</p>	<p>Plocha čela</p> 


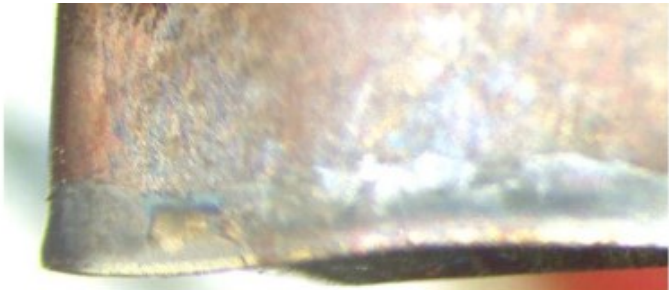
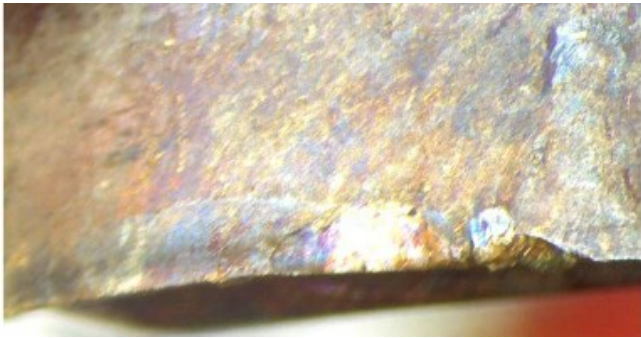
Řezné parametry	Měřená plocha
Měření: 26 $f = 1 \text{ mm}$ $a_p = 2 \text{ mm}$ $v_c = 145 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	Plocha hřbetu 

b) Korozi vzdorná ocel 1.4404

Stejně jako u předchozího obrábění korozi vzdorné oceli 1.4404 destička vykazovala opotřebení na hřbetu o šířce $VB_{\max} = 0,52 \text{ mm}$. I zde byla patrná deformace špičky nástroje. Jako kritérium opotřebení čela bylo možné považovat žlábek o délce $3,94 \text{ mm}$ a šířce $KB = 0,76 \text{ mm}$.

Tab. 23: Opotřebení VBD CP – B 1108 – M5 1115 pro korozi vzdornou ocel 1.4404

Řezné parametry	Měřená plocha
Měření: 57 $f = 0,6 \text{ mm}$ $a_p = 2 \text{ mm}$ $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	Plocha hřbetu 

Řezné parametry	Měřená plocha
<p>Měření: 60</p> <p>$f = 0,6 \text{ mm}$</p> <p>$a_p = 2 \text{ mm}$</p> <p>$v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$</p>	<p>Plocha hřbetu</p> 
<p>Měření: 63</p> <p>$f = 0,8 \text{ mm}$</p> <p>$a_p = 2 \text{ mm}$</p> <p>$v_c = 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$</p>	<p>Plocha hřbetu</p> 
<p>Měření: 66</p> <p>$f = 1 \text{ mm}$</p> <p>$a_p = 2 \text{ mm}$</p> <p>$v_c = 140 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$</p>	<p>Plocha hřbetu</p> 

4.3 Měření opotřebení VBD CP – B1108 – H3W H13A

a) Ocel C45

Jedná se o nepovlakovanou VBD, kde z důvodu vysokých řezných sil probíhalo měření při snížených řezných rychlostech, aby nedošlo k poškození měřicího zařízení dynamometru. Z důvodu nesprávného fungování měřicího programu Motic image plus 2 nebylo možné provést dokumentaci opotřebení destičky jak u oceli, tak u korozi-vzdorné oceli, proto byly místo snímků destičky použity snímky třísky. Tvar třísky závisí na druhu obráběného materiálu, geometrii nástroje, procesního média a dalších. Tříska u všech měření byla velmi podobná. Měla drobný až článkovitý tvar.

Tab. 24: Tříska materiálu C45 obráběného VBD CP – B1108 – H3W – H13A

Řezné parametry	Snímek třísky
Měření: 33 $f = 0,8 \text{ mm}$ $a_p = 2 \text{ mm}$ $v_c = 120 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	

Řezné parametry	Snímek třísky
Měření: 39 $f = 1 \text{ mm}$ $a_p = 2 \text{ mm}$ $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	




Při měření č. 38 došlo k naštípnutí a vylomení části břitu destičky. Viz obr 24. K poškození došlo při středním zatížení $f = 1 \text{ mm}$ a $v_c = 145 \text{ m} \cdot \text{min}$. Vylomení břitu mohlo být způsobeno otupením břitu destičky či velké koncentrace tepla v místě řezu, protože korozivzdorná ocel 1.4404 má menší tepelnou vodivost než ocel C45.



Obrázek 25 Poškozená VBD CP – B1108 H3W H13A

b) Korozivzdorná ocel 1.4404

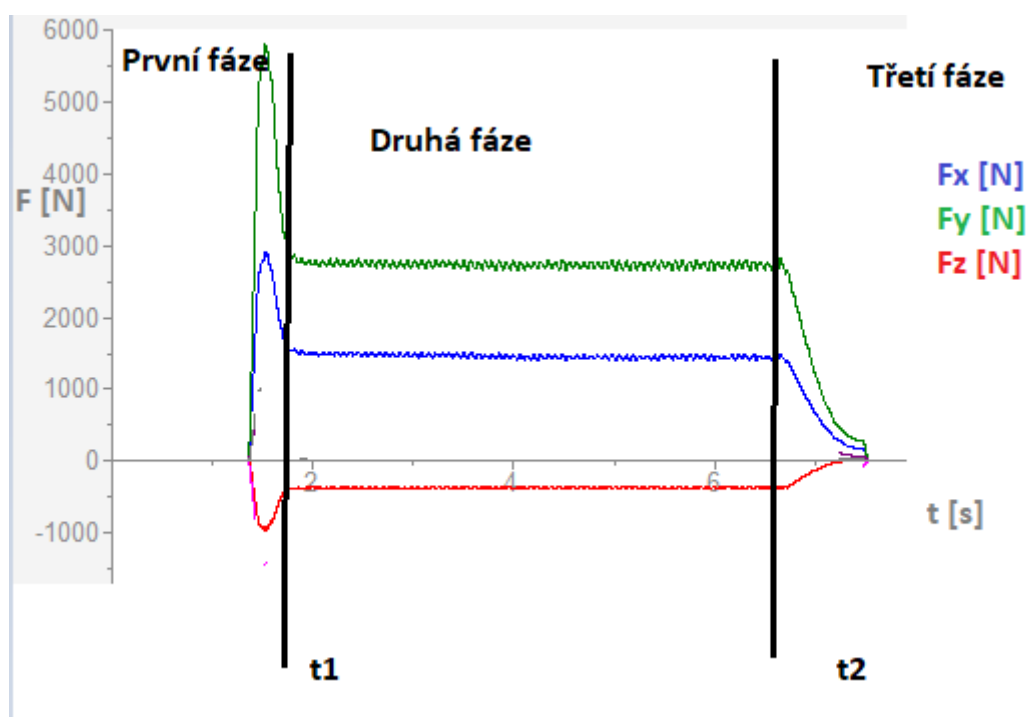
Tab. 25: Tříška materiálu 1.4404 obráběného VBD CP – B1108 – H3W H13A

Řezné parametry	Snímek třísky
<p>Měření: 69</p> <p>$f = 0,6 \text{ mm}$</p> <p>$a_p = 2 \text{ mm}$</p> <p>$v_c = 170 \text{ m.min}^{-1}$</p>	
<p>Měření: 72</p> <p>$f = 0,8 \text{ mm}$</p> <p>$a_p = 2 \text{ mm}$</p> <p>$v_c = 140 \text{ m.min}^{-1}$</p>	
<p>Měření: 77</p> <p>$f = 1 \text{ mm}$</p> <p>$a_p = 2 \text{ mm}$</p> <p>$v_c = 170 \text{ m.min}^{-1}$</p>	

5 Vyhodnocení, porovnání řezných sil a drsnosti povrchu

Jak již bylo zmíněno, experiment probíhal na obráběcím zařízení NLX 2500/700. Měřicí zařízení Kistler Eastern Europe s. r. o., byl spárovaný s potíračovým programem DynoWare. Počítačový program DynoWare znázorňoval jednotlivé průběhy řezných, posuvových a pasivních složek výsledných sil. Data byly následně z programu DynoWare exportovány do textové souboru a následně zpracovány do tabulek. Následně se dopočítala výsledné řezné síly a zhotovil se graf porovnávající tyto výsledné síly.

Měření řezného procesu probíhalo ve třech fázích. V první fázi, kdy nástroj vniká do obrobku dochází k nárůstu a ustálení řezných podmínek. Ve druhé části probíhalo měření již za ustálených řezných podmínek. Ve třetí fázi následovalo vyjetí nástroje z obrobku a dále ukončení řezného procesu. Pro vyhodnocení dat byla zvolena druhá fáze.



Obrázek 26 Grafické znázornění průběhu měření řezných sil

5.1 Vzorce pro vyhodnocení dat

Pro vyhodnocení dat z druhé fáze byl použit časový interval: $t_1 - t_2$, kde ke snímání hodnot docházelo každých 0,002s.

kde t_1 počátek druhé fáze,

t_2 konec druhé fáze.

$$F_c = F_y$$

$$F_f = -F_z$$

$$F_p = F_x$$

kde F_c je řezná složka výsledné síly,
 F_f je posuvová složka výsledné síly, působící ve směru osy obrobku,
 F_p je radiální neboli pasivní složka výsledné síly, kolmá na směr složky řezné.

$$F_v = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad [5.1]$$

kde F_v je výsledná síla soustružení.

$$f(F_{max}) \geq f(F); F_{max} \in < t_2 - t_1 >; F_i \in < t_2 - t_1 > \quad [5.2]$$

kde F_{max} je maximální hodnota síly

$$f(F_{min}) \leq f(F); F_{min} \in < t_2 - t_1 >; F_i \in < t_2 - t_1 > \quad [5.3]$$

kde F_{min} je minimální hodnota síly

$$\overline{Ra} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Ra_i \quad [5.4]$$

kde Ra je průměrná aritmetická odchylka profilu

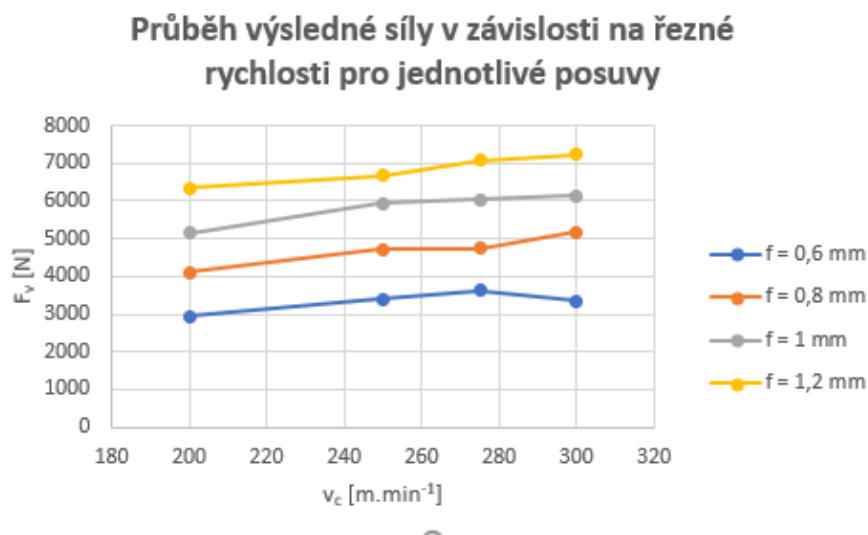
$$\overline{Rz} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Rz_i \quad [5.5]$$

kde Rz je maximální nerovnost profilu

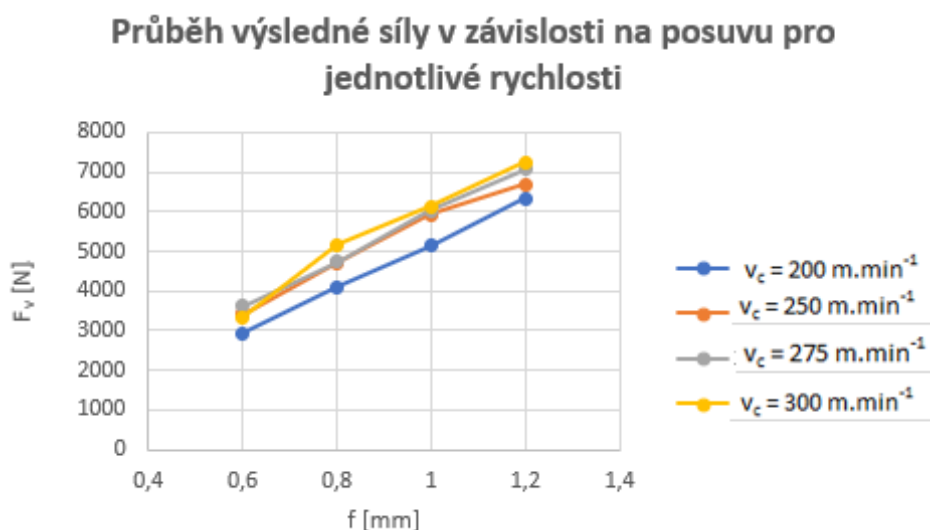
5.2 Vyhodnocení řezných sil a parametrů drsnosti povrchu Ra VBD CP - B1108 - M5 4325 pro ocel C45

Tab. 26: Naměřené hodnoty složek řezných sil a průměrné hodnoty parametrů drsnosti povrchu Ra, Rz

Pořadí:	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Materiál	-	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45
a_p	mm	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
f	mm	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1,2	1,2	1,2	1,2
v_c	m.min ⁻¹	200	250	275	300	200	250	275	300	200	250	275	300	200	250	275	300
\overline{Ra}	μm	4,328	4,6975	5,17	5,967	6,428	6,384	7,667	7,468	8,679	9,034	9,234	8,939	9,804	10,281	11,309	11,321
\overline{Rz}	μm	22,318	23,687	20,568	29,68	31,961	29,712	33,972	38,961	54,415	48,503	54,415	44,083	55,325	48,447	58,661	56,415
F_c	N	2761	3135	2961	3026	3319	4178	4094	4555	4473	5189	5630	5283	5246	5959	6245	6420
F _{Cmax}	N	3053	3203	3136	3318	3869	4326	4326	4685	4728	5328	5824	5539	5627	6428	6626	6636
F _{Cmin}	N	2469	3067	2786	2734	2769	4029	3862	4425	4218	5049	5436	5026	4865	5489	5863	6203
F_f	N	271	352	355	332	445	411	641	707	716	740	903	795	812	875	964	847
F _{fmax}	N	356	460	486	438	526	496	736	785	745	826	1054	968	965	1126	1359	1236
F _{fmin}	N	185	243	223	225	364	326	546	628	687	654	752	621	658	624	569	458
F_p	N	1356	1280	2048	1368	1544	2126	2311	2349	2207	2775	2902	2782	2798	2890	3178	3228
F _{pmax}	N	1836	1992	2657	1438	1829	2386	2489	2452	2369	2987	3069	2987	2963	3231	3597	3568
F _{pmin}	N	876	568	1438	1297	1258	1865	2132	2245	2045	2563	2735	2576	2632	2549	2758	2887
F_v	N	2936	3404	3617	3337	4103	4705	4744	5173	5139	5930	6039	6130	6337	6680	7072	7235
F _{vmax}	N	3580	3800	4139	3643	4312	4965	5045	5346	5341	6164	6667	6367	6785	7282	7661	7635
F _{vmin}	N	2626	3129	3143	3034	3063	4452	4445	5002	4738	5700	6132	5782	66314	6084	6504	6857



Obrázek 27 Průběh výsledné síly v závislosti na řezné rychlosti



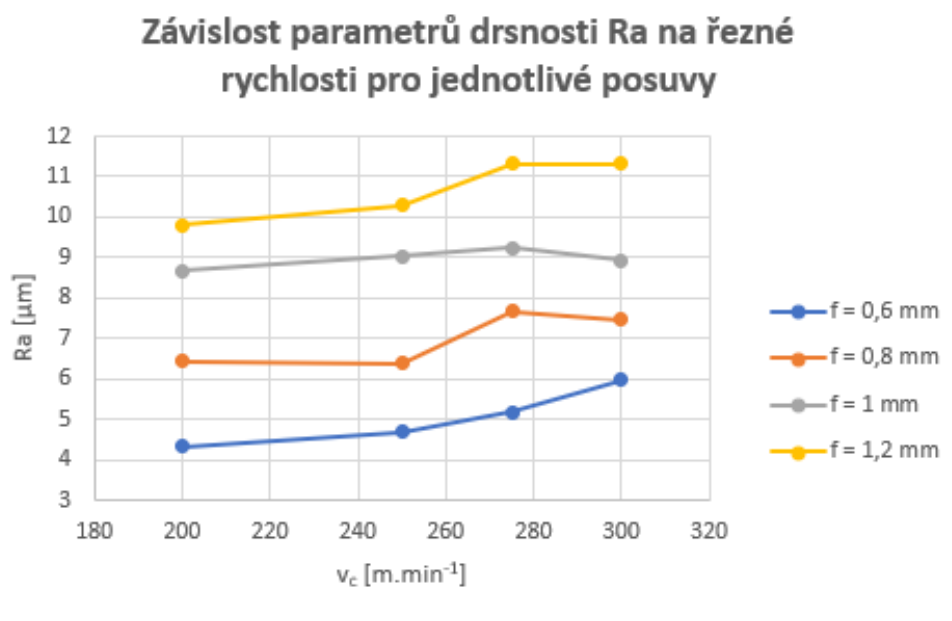
Obrázek 28 Průběh síly v závislosti na posuvu

Hlavním předpokladem bylo, že změna řezné rychlosti nebude mít velký vliv na výslednou řeznou sílu (obr. 27).

Dalším předpokladem byl lineárně zvyšující se nárůst výsledné řezné síly při konstantní řezné rychlosti se změnou posuvu. Při řezné rychlosti 200 m.min^{-1} a jednotlivých posuvech lze pozorovat menší hodnotu výsledné řezné síly než při jiných řezných rychlost a posuvech. Můžeme říct, že při řezné rychlosti $v_c = 200 \text{ m.min}^{-1}$ docházelo k výrazně menším vibracím, a to vedlo k dosažení menších výsledných sil při jednotlivých posuvech. Dále také rostla posuvová složka výsledné řezné síly se zvyšujícím se posuvem.

Při měření č. 6 se projevilo opotřebení na čele ve tvaru žlábků o délce $0,89 \text{ mm}$ a šířce $KB = 0,12 \text{ mm}$. Při posledním měření a dosažení řezné rychlosti měl žlábek délku $2,93$

mm a šířku KB = 0,93 mm. Předpoklad vzniku žlábků byla chemická reakce mezi nástrojem a materiálem obrobku. Podíl na tom měl také interval vysokých řezných rychlostí <200;300> m.min⁻¹.



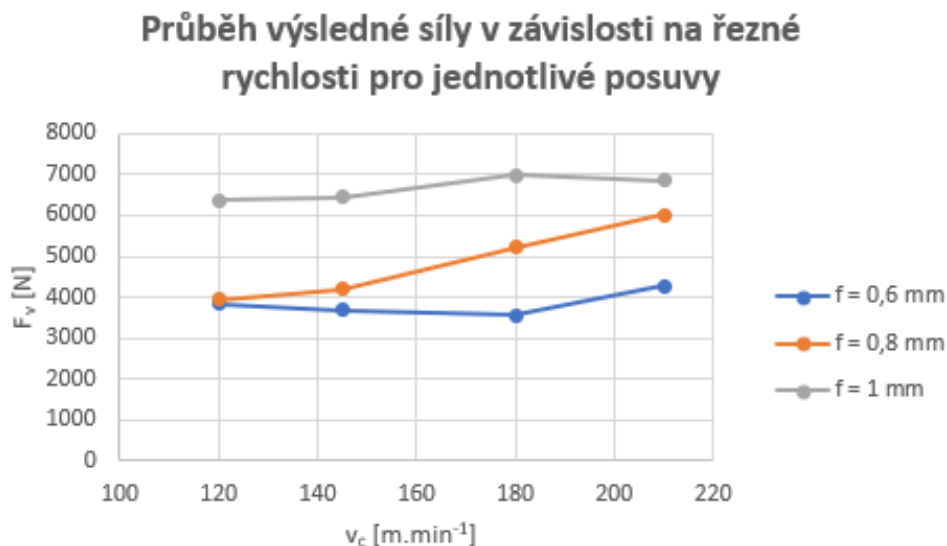
Obrázek 29 Průběh mikrogeometrie v závislosti na řezné rychlosti

U obr. 29 porovnávajícího mikrogeometrii povrchu a grafické znázornění výsledných sil při konstantním posuvu můžeme říct, že průměrná odchylka profilu lineárně roste se zvyšující se řeznou silou u posuvu 0,6 mm. U zbylých posuvů nelze přesně určit závislost výsledné síly na průměrné odchylce profilu.

5.3 Vyhodnocení řezných sil a parametrů drsnosti povrchu Ra VBD CP - B1108 - M5 1115 pro ocel C45

Tab. 26: Naměřené hodnoty složek řezných sil a průměrné hodnoty parametrů drsnosti povrchu Ra, Rz

Pořadí:		17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Materiál	-	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45
a_p	mm	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
f	mm	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1
v_c	m.min ⁻¹	120	145	180	210	120	145	180	210	120	145	180	210
\overline{Ra}	μm	4,598	6,999	5,245	8,337	6,405	7,081	7,259	6,123	8,869	9,202	9,783	10,368
\overline{Rz}	μm	28,968	29,699	32,458	36,546	28,908	39,028	33,215	26,354	33,585	43,160	42,697	44,678
F_c	N	3360	3151	3129	3058	3536	3729	4564	5211	5656	5793	6300	6053
F _{Cmax}	N	3553	3456	3567	3648	3764	3972	4689	5731	5839	6483	6726	6135
F _{Cmin}	N	3167	2846	2691	2468	3307	3486	4439	4691	5473	5103	5874	5971
F_f	N	453	663	389	443	487	601	500	688	778	894	805	977
F _{fmax}	N	539	857	539	637	379	462	639	837	937	1035	1106	1203
F _{fmin}	N	367	469	239	248	594	739	360	538	619	753	503	751
F_p	N	1780	1815	1644	2948	1699	1837	2481	2921	2822	2664	2929	3046
F _{pmax}	N	1987	2420	1928	3427	1967	1934	2567	3205	3058	3159	3318	3596
F _{pmin}	N	1573	1209	1359	2468	1430	1739	2394	2637	2585	2168	2539	2495
F_v	N	3829	3696	3556	4270	3952	4200	5218	6013	6368	6438	6994	6846
F _{vmax}	N	4106	4305	4090	5046	4264	4442	5384	6619	6658	7286	7581	7212
F _{vmin}	N	3555	3128	3024	3499	3652	3965	5056	5408	6084	5595	6419	6515

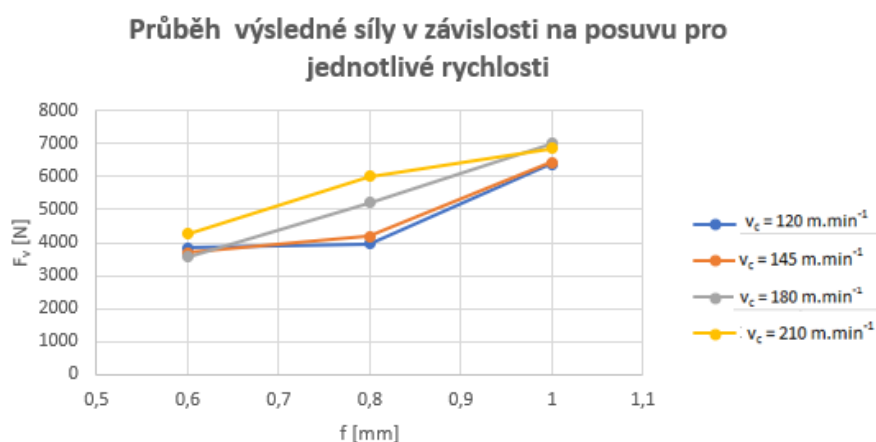


Obrázek 30 Průběh výsledné síly v závislosti na řezné rychlosti

Zde se jednalo o obrábění stejného druhu oceli C45, akorát byl snížen interval řezných rychlostí $<120;210>$ m.min⁻¹.

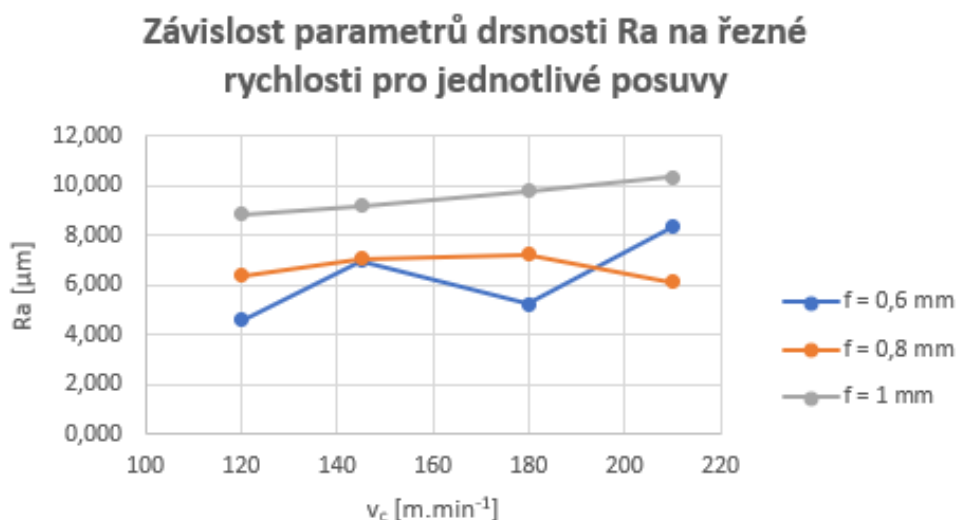
U konstantního posuvu $f = 0,6$ mm a narůstající řezné rychlosti si můžeme všimnout menšího poklesu řezné síly. Z toho můžeme usoudit, že docházelo během řezného procesu k výrazně menším vibracím. Zatím co u posuvu $f = 0,8$ mm i přes snížený řezný interval oproti původně zvolenému intervalu došlo k velmi velkému nárůstu řezné síly. Na nárůst řezné síly mohl mít vliv utvářeč třísky, stav otupení bříty, posuv, řezná rychlost či vibrace při řezném procesu. Dále se řezná síla při vyšším posuvu nijak dramaticky nezvýšila, avšak testování bylo ukončeno, aby nedošlo k poškození měřící soustavy.

Kritériem opotřebení plochy čela byl žlábek o délce 3,06 mm a šířce $KB = 0,74$ mm, který se začal vytvářet při řezné rychlosti $v_c = 180$ m.min⁻¹ a posuvu $f = 0,8$ mm.



Obrázek 31 Průběh výsledné síly v závislosti na posuvu

Na obr. 31 si můžeme všimnout, že na řezný proces neměla žádný vliv řezná rychlost a posuv do $v_c = 145 \text{ m.min}^{-1}$ a posuvu $f = 0,8 \text{ mm}$. Zbýlý prudký nárůst výsledné řezné síly mohl být způsobený vibracemi, otupením břitu nástroje, geometrií nástroje či posuvem. Pro velký nárůst řezné síly při zvyšujícím se posuvu a řezné rychlosti musel být test ukončen u posuvu $f = 1 \text{ mm}$ a řezné rychlosti $v_c = 210 \text{ m.min}^{-1}$, aby nedošlo k poškození měřícího zařízení.



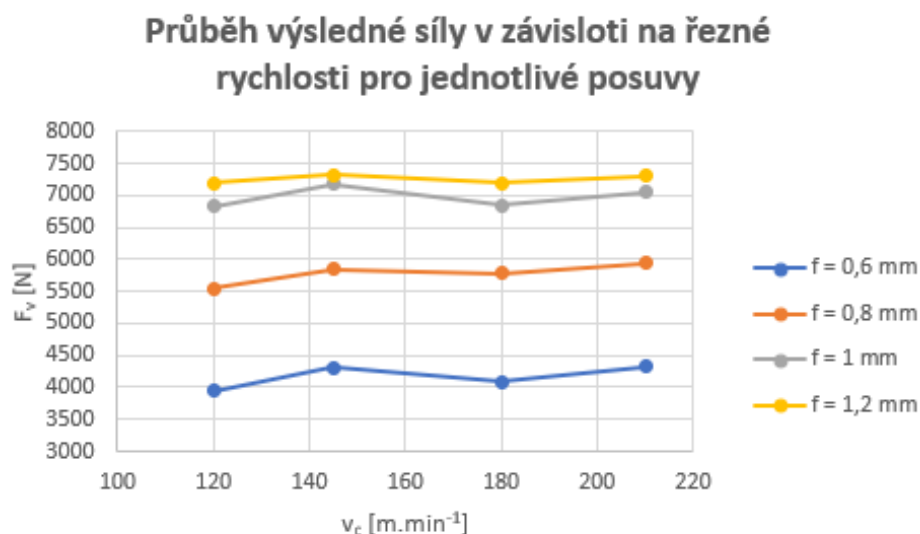
Obrázek 32 Průběh mikrogeometrie v závislosti na řezné rychlosti

Na obr. 32 vidíme lineární nárůst průměrné odchylky povrchu při konstantním posuvu $f = 1 \text{ mm}$ a zvyšující se řezné rychlosti. U zbylých posuvů není možné závislost jednoznačně určit. Pro stanovení závislosti drsnosti na řezné rychlosti by bylo nutné udělat více experimentu.

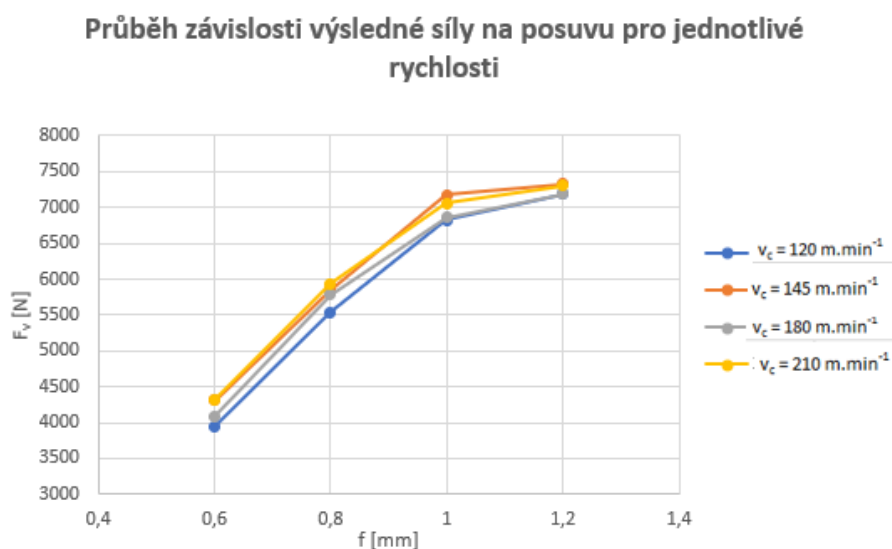
5.4 Vyhodnocení řezných sil a parametrů drsnosti povrchu Ra VBD CP - B1108 - H3W H13A pro ocel C45

Tab. 27: Naměřené hodnoty složek řezných sil a průměrné hodnoty parametrů drsnosti povrchu Ra, Rz

Pořadí:	-	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
Materiál	-	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45
a_p	mm	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
f	mm	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1,2	1,2	1,2	1,2
v_c	m.min ⁻¹	120	145	180	210	120	145	180	210	120	145	180	210	120	145	180	210
\overline{Ra}	μm	2,216	2,269	4,379	5,424	4,939	3,783	4,159	3,452	3,917	4,220	3,984	4,110	5,765	7,658	7,103	8,689
\overline{Rz}	μm	11,381	12,269	20,002	27,824	23,704	19,622	19,661	16,255	20,793	20,828	18,837	19,879	26,468	30,209	31,595	34,698
F_c	N	3455	3836	3586	4014	4930	5149	5368	5522	6082	6337	6010	6222	6460	6427	6432	6234
F _{Cmax}	N	3784	4102	3940	4267	5239	5532	5697	5739	6428	6729	6423	6678	6882	6820	6926	7329
F _{Cmin}	N	3125	3569	3231	3761	4620	4765	5039	5304	5735	5945	5597	5765	6037	6034	5937	5139
F_f	N	553	564	622	583	762	731	648	762	768	948	789	1057	753	1311	1242	1316
F _{fmax}	N	738	765	924	739	869	875	776	876	956	1238	1039	1239	1038	1687	1752	1863
F _{fmin}	N	367	363	320	426	654	587	520	647	579	657	539	874	467	934	731	768
F_p	N	1832	1878	1852	2390	2419	2690	2669	2729	3011	3230	3202	3154	3073	3260	2965	3025
F _{pmax}	N	2095	2102	2101	2670	2620	2965	3201	3109	3476	3596	3640	3451	3678	3750	3751	3671
F _{pmin}	N	1568	1654	1603	2110	2217	2414	2136	2349	2546	2863	2764	2856	2468	2769	2179	2379
F_v	N	3949	4308	4083	4326	5543	5854	5789	5938	6829	7175	6855	7055	7193	7324	7190	7321
F _{vmax}	N	4388	4672	4560	4869	5922	6337	6359	6452	7370	7729	7455	7618	7872	7964	8069	8406
F _{vmin}	N	3516	3950	3621	3943	5166	5374	5498	5489	6301	6631	6266	6493	6539	6704	6366	5715



Obrázek 33 Průběh výsledné síly v závislosti na řezné rychlosti

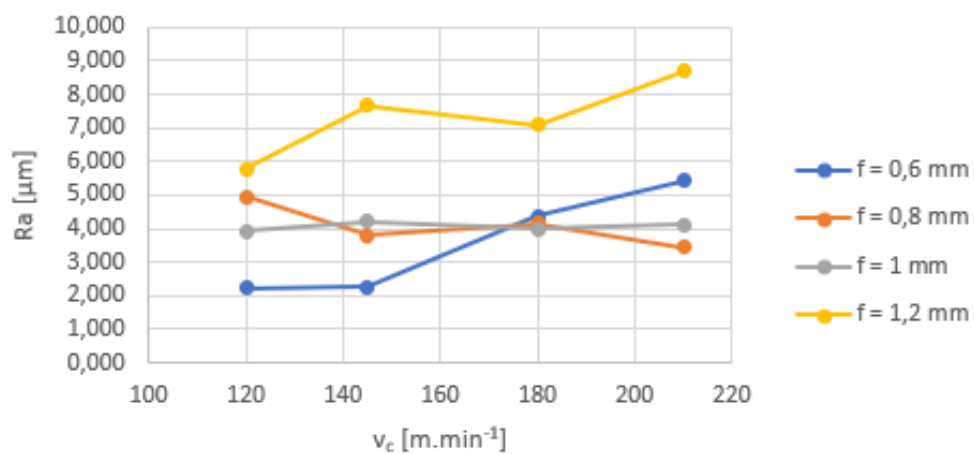


Obrázek 34 Průběh závislosti výsledné síly na posuvu

Na obr. 32 si můžeme všimnout podobného průběhu výsledných řezných sil jako u VBD CP – B1108 – M5 4325. Řezná rychlost neměla na řeznou sílu velký vliv.

Lineární průběh zvyšující se řezné síly při konstantní řezné rychlosti lze pozorovat na obr. 33. U vyššího posuvu $f = 1$ mm si můžeme všimnout mírného náznaku stabilizování řezné síly. Průměrná odchylka povrchu ve vyšších posuvech byla menší než u povlakované VBD CP – B1108 – M5 4325. Můžeme říci, že destička je vhodná pro vyšší posuvy, kde dostaneme menší drsnost povrchu, avšak za rizika vysokých řezných sil a tím i poškození destičky či obrobku.

Závislost parametrů drsnosti Ra na řezné rychlosti pro jednotlivé posuvy



Obrázek 35 Závislost parametrů drsnosti Ra na řezné rychlosti

Drsnost, která byla dosažena při posuvech $f = 0,8$ a $f = 1$ mm, nejevila velký rozptyl. Proto můžeme říct, že při těchto posuvech docházelo k minimálním vibracím.

5.5 Vyhodnocení řezných sil a parametrů drsnosti povrchu Ra VBD CP – B1108 – M5 4325, CP B1108 – M5 1115 a CP-B1108-H3W H13A pro korozivzdornou ocel 1.4404

Tab. 28: Naměřené hodnoty složek řezných sil a průměrné hodnoty parametrů drsnosti povrchu Ra, Rz

Pořadí:	-	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
Materiál	-	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404
a _p	mm	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
f	mm	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1
v _c	m.min ⁻¹	110	140	170	200	110	140	170	200	110	140	170	200
\overline{Ra}	μm	4,545	5,498	7,838	6,069	5,816	6,027	5,385	4,358	8,888	7,677	7,551	8,697
\overline{Rz}	μm	35,735	22,975	30,77	43,906	25,564	28,528	25,039	24,238	40,087	32,77	34,556	36,759
F_c	N	3409	3657	3569	3803	4238	4684	4385	4988	3069	4685	3620	3902
F _{cmax}	N	3864	3951	3729	4239	4630	5039	4823	5846	3489	5423	4130	4539
F _{cmin}	N	2954	3362	3408	3367	3846	4328	3946	4130	2648	3946	3109	3264
F_f	N	421	503	584	365	450	530	650	543	846	611	304	463
F _{fmax}	N	521	693	628	498	542	639	864	756	1034	964	439	657
F _{fmin}	N	320	312	539	231	357	421	435	329	658	258	168	269
F_p	N	1899	1770	1748	1947	1731	2440	2544	2398	1362	2315	2004	2010
F _{pmax}	N	2103	2102	1964	2364	2064	2641	2746	2931	1756	2869	2139	2531
F _{pmin}	N	1695	1438	1532	1530	1398	2239	2341	1864	968	1760	1869	1489
F_v	N	3925	4093	4016	4288	4600	5308	5110	5561	3462	5261	4148	4413
F _{vmax}	N	4430	4529	4261	4879	5098	5725	5617	6583	4041	6210	4672	5238
F _{vmin}	N	3421	3670	3775	3706	4108	4891	4609	4543	2895	4328	3631	3598

Tab. 29: Naměřené hodnoty složek řezných sil a průměrné hodnoty parametrů drsnosti povrchu Ra, Rz

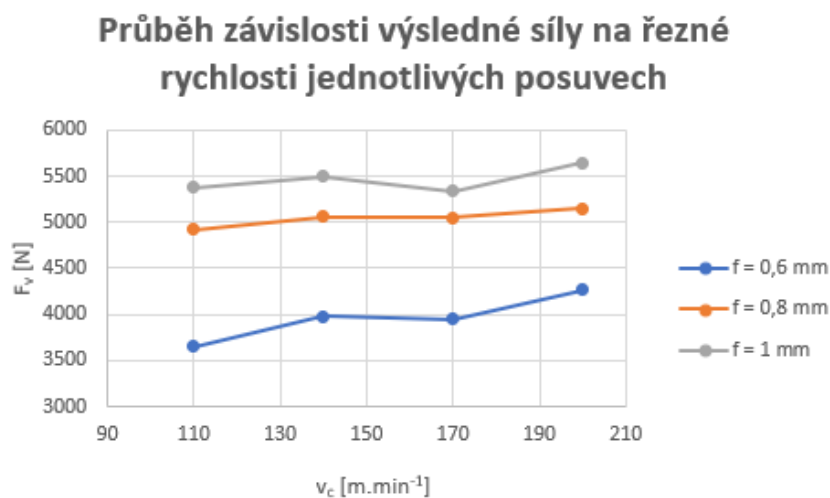
Pořadí:	-	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68
Materiál	-	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404
a _p	mm	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
f	mm	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1
v _c	m.min ⁻¹	110	140	170	200	110	140	170	200	110	140	170	200
\overline{Ra}	μm	3,922	3,074	9,753	8,903	6,997	8,936	9,211	7,518	8,635	8,562	7,896	9,873
\overline{Rz}	μm	19,406	16,411	46,795	44,414	31,740	43,721	44,068	36,676	37,505	39,902	31,215	40,589
F_c	N	3243	3442	3514	3760	4393	4496	4454	4565	4816	4838	4754	5159
F _{cmax}	N	3539	3869	3779	4091	4687	4756	4769	4890	5463	5638	5639	5934
F _{cmin}	N	2947	3015	3248	3429	4098	4235	4139	4239	4168	4038	3869	4384
F_f	N	533	428	463	502	562	678	750	687	676	861	683	579
F _{fmax}	N	627	536	597	563	623	826	936	934	864	1024	938	729
F _{fmin}	N	439	320	329	441	501	530	564	439	487	697	428	428
F_p	N	1578	1946	1735	1949	2157	2228	2250	2278	2300	2471	2340	2212
F _{pmax}	N	1758	2134	1934	2394	2450	2469	2637	2601	2863	2839	2930	2901
F _{pmin}	N	1397	1758	1536	1503	1863	1987	1863	1954	1736	2103	1750	1523
F_v	N	3645	3977	3946	4265	4925	5063	5046	5147	5379	5500	5343	5643
F _{vmax}	N	4001	4451	4287	4773	5325	5422	5529	5617	6228	6395	6424	6645
F _{vmin}	N	3291	3505	3608	3770	4529	4708	4574	4688	4541	4606	4268	4661

Tab. 30: Naměřené hodnoty složek řezných sil a průměrné hodnoty parametrů drsnosti povrchu Ra, Rz

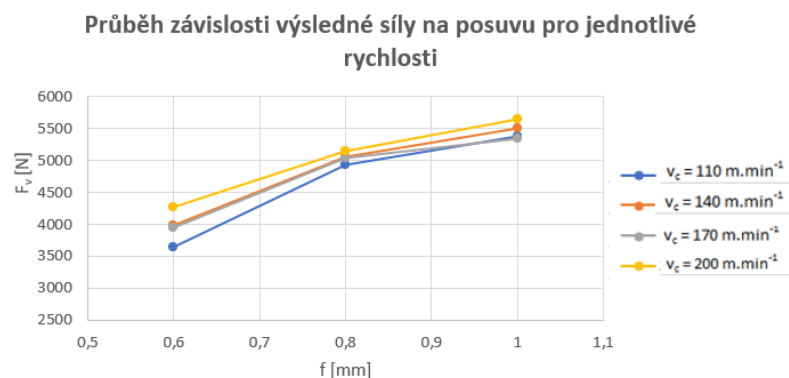
Pořadí:	-	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Materiál	-	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404
a _p	mm	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
f	mm	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1
v _c	m.min ⁻¹	110	140	170	200	110	140	170	200	110	140	170	200
\overline{Ra}	μm	2,534	2,392	1,894	4,310	3,519	3,201	2,632	6,496	5,686	4,327	4,296	6,362
\overline{Rz}	μm	14,756	12,019	9,123	23,243	17,877	15,234	9,888	28,824	25,183	20,992	21,091	26,223
F_c	N	4022	3829	3676	4539	4649	3589	5270	6091	6178	5744	5826	5866
F _{cmax}	N	4396	4638	4103	5039	5349	3720	5971	6504	6587	6249	6138	6318
F _{cmin}	N	3648	3019	3248	4038	3948	3458	4568	5678	5769	5238	5514	5414
F_f	N	629	548	743	666	792	421	687	812	1014	1209	1096	1287
F _{fmax}	N	721	628	938	834	934	594	921	1101	1268	1568	1258	1542
F _{fmin}	N	536	468	548	497	649	248	452	523	759	849	934	1031
F_p	N	1831	1944	2183	2613	2399	1811	2653	3010	3143	2794	2493	2759
F _{pmax}	N	2012	2348	2678	2849	2849	1964	2948	3452	3416	3246	2940	3205
F _{pmin}	N	1649	1539	1687	2376	1948	1658	2358	2568	2869	2341	2046	2312
F_v	N	4463	4328	4339	5279	5290	4042	5939	6842	7005	6500	6431	6609
F _{vmax}	N	4888	5236	4989	5848	6132	4248	6722	7445	7528	7214	6921	7250
F _{vmin}	N	4039	3421	3701	4711	4450	3843	5161	6254	6488	5800	5955	5977

Jelikož je korozivzdorná ocel 1.4404 náročnější na obrábění oproti oceli C45 byl změněn interval řezných rychlostí u všech typů destiček na $<110;200> \text{ m.min}^{-1}$. Z důvodu velkého řezného odporu a velké zátěže měřicí soustavy, kde docházelo až k přetížení, jsem omezil i interval posuvů a to na $<0,6;1> \text{ mm}$. Dále materiál kladl i vysoké nároky na obráběcí zařízení a tím i na destičku, která se často pohybovala na hraně své životnosti, kde docházelo k většímu opotřebení než u oceli.

Vhodný průběh řezných sil při zpětném soustružení materiálu 1.4404 vykazovala destička CP – B1108 – M5 1115. Při konstantním posuvu a nárůstu řezné rychlosti nedocházelo ke znatelnému rozptylu výsledných řezných sil jako u zbylých destiček obr. 36. Dále, při konstantní řezné rychlosti a zvyšujícím se posuvu, lze na obr. 37 pozorovat lineární nárůst řezné síly. Dále také rostla posuvová složka se zvyšujícím se posuvem. Ihned po prvním měření došlo ke ztrátě povlaku na VBD. Postupně se začala opotřebovávat plocha hřbetu a čela. Opotřebení hřbetu ve finální fázi bylo o šířce $VB_{\max} = 0,52 \text{ mm}$. Opotřebení na čele se projevilo ve tvaru žlábků o délce $3,94 \text{ mm}$ a šířce $KB = 0,76 \text{ mm}$. Při posuvu $f = 1 \text{ mm}$ a řezné rychlosti 140 m.min^{-1} se projevila i deformace špičky.

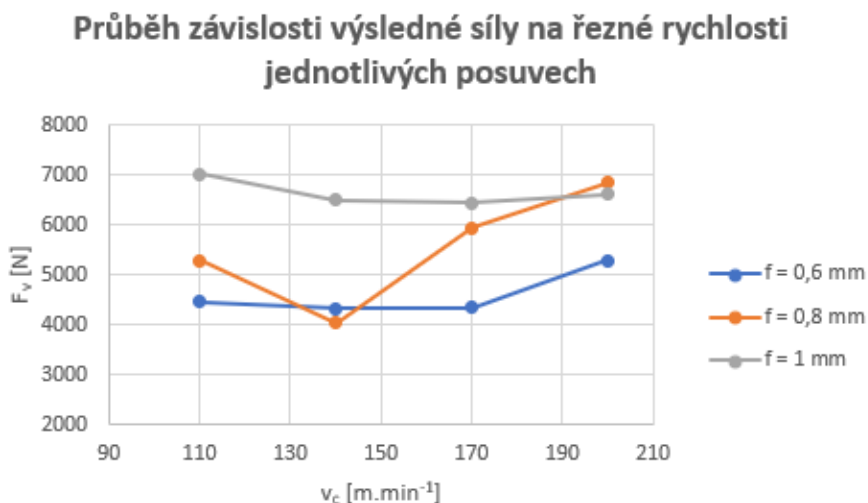


Obrázek 36 Průběh závislosti výsledných sil na řezné rychlosti u VBD CP – B1108 - M5 1115

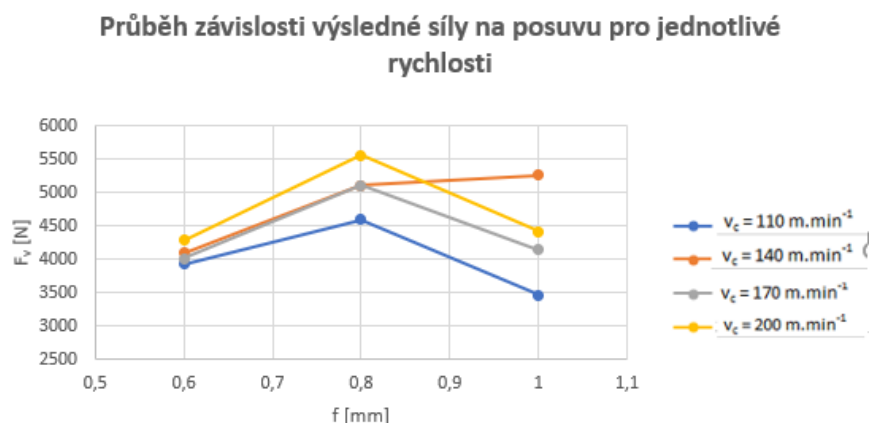


Obrázek 37 Průběh závislosti výsledných sil na posuvu u VBD CP – B1108 – M5 1115

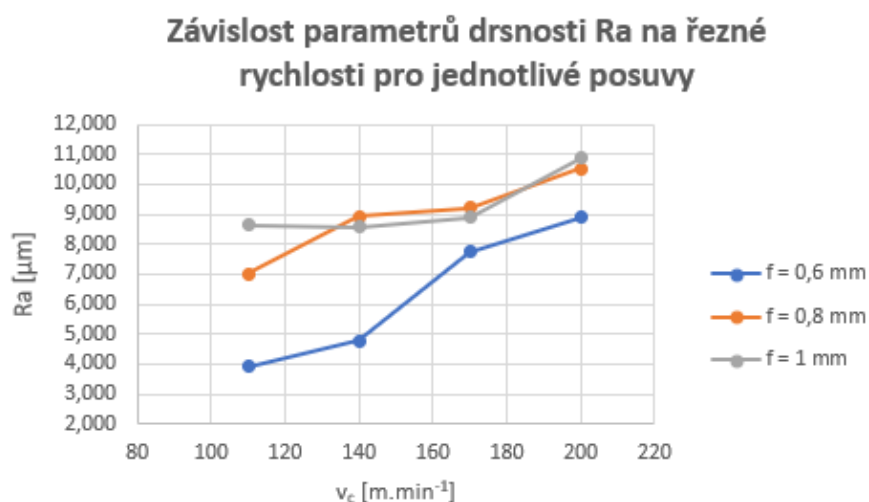
Zbylé dva typy destiček CP B1108 – M5 4325 a CP B1108 – H3W H13A vykazovaly jak při změně rychlosti, tak posuvu znatelné propady či nepředvídatelné zvýšení řezné síly (obr 38 a 39). Propady a nárůsty řezných sil mohli být způsobeny horší obrobitelností nerezové oceli. Při obrábění oceli vznikají vysoké teploty a díky špatné tepelné vodivosti se teplo přenáší do obrobku či nástroje. Dále mohlo dojít k vytvoření nárůstku mezi čelem a třískou díky plastické deformaci, která tam vznikla. Nárůstek mohl rozkmitat nástroj či obrobek nebo změnit geometrii nástroje.



Obrázek 38 Průběh závislosti řezné síly na rychlosti u VBD CP - B1108 H3W H13A



Obrázek 39 Průběh závislosti výsledné síly na posuvu u VBD CP - B1108 -M5 4325



Obrázek 40 Závislost parametrů drsnosti Ra na řezné rychlosti VBD CP – B1108 – M5 1115

Na obr. 40 je znázorněna mikrogeometrie povrchu po obrábění pomocí VBD CP – B1108 – M5 1115. Při posuvu $f = 0,6$ drsnost povrchu Ra lineárně rostla se zvyšující se řeznou rychlostí. Průměrná drsnost Ra se pohybovala v relativně nízkých hodnotách s ohledem na obráběný materiál (korozivzdorná ocel 1.4404). Avšak největší odchylka profilu Rz se pohybovala v intervalu $<16,14;46,795> \mu\text{m}$. Proto je mikrogeometrie vhodná a dostačující pouze pro hrubovací operace.

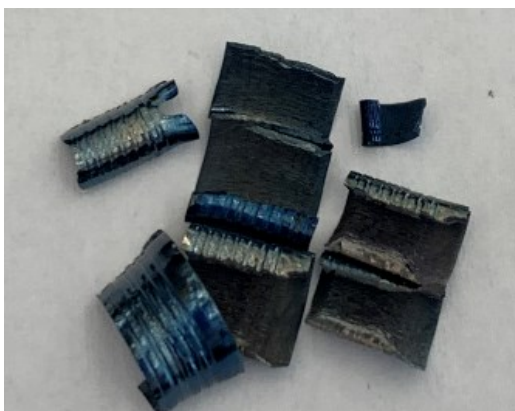
5.6 Charakteristika třísek

Jak při soustružení oceli C45, tak při soustružení korozivzdorné oceli C45 vznikaly dost podobné třísky. U oceli C45 se tvořily jemné, drobné až článkovité třísky s lehkým

tepelným zbarvením do modra. U korozivzdorné oceli 1.4404 se tvořily také článkovité až drobné třísky. Třísky byly odváděny po čele z místa řezu.



Obrázek 41 Tříska z mat. C45 obráběného VBD CP - B1108 - M5 4325



Obrázek 42 Tříska z mat. C45 obráběného VBD CP - B1108 - M5 1115



Obrázek 43 Tříska z mat. 1.4404 obráběného VBD CP - B1108 - M5 1115

6 Závěr

Při obrábění materiálu C45 některé vyměnitelné břitové destičky vykazovaly pouhé zbarvení břitu, které bylo způsobeno velkým tepelným účinkem vzniklým při řezném procesu. U některých se projevilo opotřebení čela ve tvaru žlábků či opotřebení hřbetu. Opotřebení čela bylo způsobeno chemickou reakcí mezi nástrojem a materiálem obrobku a také zvyšující se řeznou rychlostí. Opotřebení hřbetu bylo způsobeno abrazivním opotřebením, na které měly podíl tvrdá zrna obsažená v materiálu obrobku a docházelo tak k otěru. Pro zamezení takového opotřebení by bylo vhodné použít procesní médium.

Ze silové analýzy všech destiček u materiálu C45 si nejlépe vedla povlakovaná destička typu CP B1108 – M5 4325, která dokončila celý test za původně stanovených řezných podmínek, bez nutnosti snížení řezných podmínek kvůli riziku poškození dynamometru. Dále je patrné, že na řezný proces měl vliv nejvíce posuv. Pro praktické uplatnění s využitím nejvyšší produktivity mohu doporučit tedy destičku typu CP – B1108 – M5 4325 s nastavením řezných podmínek pro posuv v intervalu $\langle 0,6;0,8 \rangle$ mm a řeznou rychlost v intervalu $\langle 200;300 \rangle$ m.min⁻¹. U dalších dvou typů destiček CP – B1108 – M5 1115 a CP – B1108 – H3W a H13A byly sníženy intervaly řezných rychlostí na $\langle 120;210 \rangle$ m/min, aby nedošlo k poškození měřicí soustavy. Průměrná drsnost obrobeného povrchu u materiálu C45 se pohybovala v intervalu $\langle 2,12;10,368 \rangle$ μm. Proto doporučuji všechny tři typy destiček pouze pro hrubovací operace materiálu C45.

Při obrábění korozivzdorné oceli 1.4404 musel být upraven interval řezných rychlostí na $\langle 110;200 \rangle$ m.min⁻¹ z důvodu náročnosti materiálu na obrábění. Dále byl také upraven interval posuvů na $\langle 0,6;1 \rangle$ mm z důvodu kladení velké zátěže na měřicí soustavu a její možné poškození. Při obrábění materiálu 1.4404 s destičkou CP – B1108 – M5 4325 a CP – B1108 – M5 1115 lze pozorovat ztrátu povlaku a následné opotřebení hřbetu s deformací špičky nástroje. Dalším kritériem opotřebení bylo vytvoření žlábků na čele nástroje. Ze silové analýzy je patrné, že destičky vykazovaly vysoké namáhání ve všech směrech. Náhlé poklesy sil mohly být způsobeny vysokým tepelným účinkem v oblasti řezu, otupením břitu či vytvořením nárustku. Nejlépe v testu obstála VBD CP – B1108 -M5 1115, u které výsledná řezná síla lineárně rostla spolu se zvyšující se posuvem. Avšak pro vysoké hodnoty drsnosti povrchu, je tato destička vhodná pouze pro hrubovací operace u materiálu 1.4404.

Seznam použitých zdrojů

- [1] *Sandvik Coromant CZ s. r. o.: Historie* [online]. [cit. 2019-11-26]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/aboutus/pages/default.aspx>
- [2] *Sandvik Coromant CZ s. r. o.: Soustružení všemi směry.* [online]. [cit. 2019-11-26]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coroturn_prime/pages/default.aspx
- [3] *MM: Revoluce soustružení* [online]. [cit. 2019-11-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/revoluce-v-soustruzeni-netradicni-pouziti-zavedeneho-procesu.html>
- [4] *Sandvik Coromant CZ s. r. o.: CoroPlus* [online]. [cit. 2019-11-26]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coroplus-toolpath/pages/primeturning.aspx>
- [5] *Sandvik Coromant CZ s. r. o.: zpětné soustružení* [online]. [cit. 2019-11-26]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/campaigns/primeturning/Pages/default.aspx?internal_camplink=primeturning&internal_camplink_type=news#
- [6] Příručka obrábění: kniha pro praktiky. Praha: Sandvik Coromant, 1997. ISBN 9197229946.
- [7] CoroTurn® Prime: Sandvik coromant [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/brochures/c-s-cz/c-1040-191.pdf>
- [8] *Sandvik Coromant CZ s. r. o.: Zkrácení času u soustružení* [online]. [cit. 2019-11-26]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/mww/pages/t_coroturnsoftware.aspx
- [9] BILÍK, Oldřich. Obrábění I. 1. vyd. Ostrava: VŠB -Technická univerzita Ostrava, 2002, 71 s. ISBN 80-248-0033-0.
- [10] BILÍK, Oldřich. Obrábění II. 2. vyd. Ostrava: VŠB -Technická univerzita Ostrava, 2001, 113 s. ISBN 80-7078-944-1
- [11] DMG MORI [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://us.dmgmori.com/products/machines/turning/universal-turning/nlx/nlx-2500>

[12] *Decoil* [online]. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://eshop.fina-oleje.cz/t221k4kn/eshop/10-1-DECOIL/0/5/1070-DECOCUT-1040-190-kg>

[13] CoroTurn® Prime: Sandvik coromant [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://sandvik.ecbook.se/se/cs/turning_tools_2017/

[14] *Nástrojové materiály* [online]. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>

[15] *Kistler* [online]. [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://translate.google.com/translate?hl=cs&sl=en&u=https://www.kistler.com/en/applications/sensor-technology/cutting-force-measurement/milling/kistler-type-9139aa-temperature-compensated-stationary-dynamometer/&prev=search>

[16] *Intraco Micro, spol. s r. o.* [online]. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.mikroskopy-optika.cz/mikroskopy/?vyrobce%5B4%5D=1>

[17] Mitutoyo Europe GmbH[online]. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: [https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/1292249246959/Surface%20Roughness%20Measuring%20Instrument/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/178-560-01D/index.xhtml](https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/1292249246959/Surface%20Roughness%20Measuring%20Instrument/$catalogue/mitutoyoData/PR/178-560-01D/index.xhtml)

[18] ČSN ISO 690-2(01 0197) Informace a dokumentace - Bibliografické citace. Praha: Český normalizační institut, 2000.